

ENTRIA

ENTSORGUNGSOPTIONEN FÜR RADIOAKTIVE RESTSTOFFE:
INTERDISZIPLINÄRE ANALYSEN UND
ENTWICKLUNG VON BEWERTUNGSGRUNDLAGEN

Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen (ENTRIA, 2013-2018):

Abschlussbericht

Ergebnisse und Leistungsbilanz

Redaktion:

Klaus-Jürgen Röhlig
Saleem Chaudry
Elmar Plischke

verantwortlich für die Arbeitspakete:

Achim Brunnengräber
Harald Budelmann
Anne Eckhardt
Horst Geckeis
Thomas Hassel
Peter Hocke
Karl-Heinz Lux

Kurt Mengel
Konrad Ott
Klaus-Jürgen Röhlig
Ulrich Smeddinck
Joachim Stahlmann
Clemens Walther

www.entria.de

DOI: 10.21268/20190225-1

ISBN: 978-3-86948-679-6

Kontakt

Technische Universität Clausthal
Institut für Endlagerforschung
Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig
Adolph-Roemer-Str. 2a
38678 Clausthal-Zellerfeld
kjr@tu-clausthal.de

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 02S9082A bis E und 15S9082A bis E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

Wir danken dem BMBF für die Förderung des Vorhabens, dem Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz und dem Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur, den Projektträgern Karlsruhe und Köln, den Mitgliedern des Beirats für die Unterstützung bei der Durchführung. Ebenso gilt der Dank allen am Vorhaben beteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die geleistete Arbeit sowie die Erstellung von Beiträgen für diesen Bericht und deren kritische und konstruktive Durchsicht, den Beteiligten an der Organisation der Abschlusskonferenz und der Veranstaltung für die interessierte Öffentlichkeit „Radioaktive Abfälle - was nun?“ sowie allen Vortragenden, weiterhin allen, die zum Gelingen der vielfältigen weiteren Veranstaltungen beigetragen haben.

Alphabetische Liste der Autoren

Michael Bauer, Frank Becker, Elke Bozau, Achim Brunnengräber, Harald Budelmann, Saleem Chaudry, Maria Rosaria Di Nucci, Cord Drögemüller, Anne Eckhardt, Ida Epkenhans, David Fellhauer, Horst Geckeis, Thomas Hassel, Ina Heinze, Dirk Herrling, Peter Hocke, Ansgar Köhler, Dennis Köhnke, Claudia König, Jürgen Kreusch, Sophie Kuppler, Rocio Paola León Vargas, Xiaoshuo Li, Karl-Heinz Lux, Melanie Mbah, Kurt Mengel, Volker Metz, Volker Mintzlaff, Markus Mlinaric, Wolfgang Neumann, Konrad Ott, Elmar Plischke, Julia Pohlers, Erik Pönitz, Manuel Reichardt, Moritz Riemann, Klaus-Jürgen Röhlig, Franziska Semper, Ulrich Smeddinck, Joachim Stahlmann, Frank Tawussi, Clemens Walther, Ralf Wolters, Nele Wulf, Juan Zhao

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	10
2	Einleitung	18
3	Interdisziplinäre Analysen	24
3.1	Prozessanalyse	24
3.1.1	Voraussetzungen und Ausgangslage	24
3.1.2	Dynamik des Forschungsgegenstandes, Erwartungen von außen	24
3.1.3	Projektfortschritt und vorgenommene Anpassungen	25
3.1.4	Methodenreflexion	37
3.2	Naturwissenschaftlich-technische Grundannahmen zur Analyse der Optionen	50
3.2.1	Referenzkonzepte und -modelle, Szenarien: Grundlagen	50
3.2.2	Die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der Referenzmodelle	52
3.2.3	Das Sicherheitskonzept der Referenzmodelle für die Tiefenlager	53
3.2.4	Das Sicherheitskonzept für die Oberflächenlagerung	58
3.2.5	Referenzmodelle: Grundlage der Untersuchungen zu Tiefenlagern in den Vertikalprojekten 5 und 6 . .	61
3.2.6	Annahmen zu Oberflächenlagern	70
3.2.7	Szenarien und Rechenfälle	71
3.2.8	THM Modellierung (nach Überführung in ein Endlager)	75
3.2.9	Entwicklung von Anforderungen für die ENCON-Behälter	84
3.2.10	Gestaltung der technischen Barriere in Abhängigkeit vom Wirtsgestein und vom Endlagerkonzept . .	88
3.3	Ausgewählte interdisziplinäre Beiträge zu naturwissenschaftlich-technischen Fragestellungen	95
3.3.1	Reduzierung ausgewählter Robustheitsdefizite bei der Bewertung des Endlagersystemverhaltens	95
3.3.2	Abschirmungseigenschaften verschiedener Betone .	97

3.3.3	Kritische Evaluation der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum § 47 der Strahlenschutzverordnung . . .	105
3.3.4	Endlager unter geänderten Klimabedingungen . . .	110
3.4	Risiko und Sicherheit	116
3.4.1	Transversalprojekt Interdisziplinäre Risikoforschung	116
3.4.2	Vergleichende Risikobewertung	118
3.4.3	Bewertungsansätze	120
3.4.4	Risikolandschaft	122
3.5	Grenzwerte	125
3.5.1	Grenzwertbildung im Strahlenschutz – Werkstattgespräch und Tagungsband	126
3.5.2	Grenzwerte-Papier	130
3.6	Technische und gesellschaftliche Aspekte des Monitorings	136
3.6.1	Einleitung	136
3.6.2	Ziele und Grenzen des Monitorings im Nahfeld-Bereich	137
3.6.3	Grenzen des Monitorings der technischen Barriere .	142
3.6.4	Monitoring der technischen Barriere (Konzept zum Behältermonitoring des IW)	150
3.6.5	Monitoring der geotechnischen und geologischen Barrieren (Monitoringkonzept des IGB)	154
3.6.6	Technisches Monitoring und Long-term Governance – Erfahrungsbericht Workshop September 2016 .	157
3.6.7	Ausblick und offene Fragen	164
3.7	Governance als Modus politischer Steuerung und Möglichkeit der Konfliktregulierung	167
3.7.1	Governance als modernes Regieren	168
3.7.2	Politisches Entscheiden im Mehrebenen-System . .	179
3.7.3	Exkurs: Erwartungen ausgewählter Akteure an Governance	193
3.7.4	Regulierung und Governance	201
3.7.5	Long-term Governance als wichtige institutionelle Herausforderung	206
3.7.6	Hauptergebnisse aus der Governance-Forschung . .	210
3.8	Interdisziplinäre normative Analysen zu Gerechtigkeit . . .	233
3.8.1	Einleitung	234
3.8.2	Gerechtigkeit: Prozessqualität, Verteilung, Bereitswilligkeit	238
3.8.3	Emotionen als Rationalität eigener Art	245
3.8.4	Bereitwilligkeit in Recht und Ethik	252
3.8.5	Gerechtigkeit zwischen den Generationen	265

3.8.6	Interdisziplinäre Einsichten zur langfristigen Oberflächenlagerung	270
3.8.7	Einsichten und Ausblicke	272
4	Synthese: Bewertungsgrundlagen	285
4.1	Der Forschungsgegenstand der Plattform ENTRIA	285
4.2	Bewertungsgrundlagen	285
4.3	Wissenschaftsethos als Leitmotiv der wissenschaftlichen Praxis	286
4.4	Akzeptabilität und Diskursivität	288
4.5	Grundsätze	290
4.6	Schritte zur Kriteriologie	292
4.7	Übergang zur Politik und die Frage der Akzeptanz	296
4.8	Operationalisierung der Bewertungsgrundlagen	297
4.9	Entsorgungsoptionen, Bewertungsgrundlagen und Architektur	298
4.10	Beiträge des Vorhabens ENTRIA zu den Bewertungsgrundlagen	304
5	Ergebnisse der Teilprojekte	311
5.1	Einführung	311
5.2	Transversalprojekt 2 - Technikfolgenabschätzung und Governance	312
5.2.1	Aufgabenstellung und Stand der Forschung für das Arbeitspaket „Governance zwischen Wissenschaft und öffentlichem Protest“	312
5.2.2	Aufgabenstellung und Stand der Forschung für das Arbeitspaket „Nukleare Entsorgung aus Multi-Level-Governance-Perspektive“	317
5.2.3	Governance aus Sicht der Technikfolgenabschätzung und der Politikwissenschaften	319
5.2.4	Auswertung internationaler und nationaler Erfahrungen (Promotionsvorhaben)	344
5.2.5	Transversalprojekt 2 als interdisziplinäre Kooperation	355
5.2.6	Hauptergebnisse	364
5.3	Transversalprojekt 3 - Ethisch-moralische Begründung, rechtliche Voraussetzungen und Implikationen	392
5.3.1	AP „Sicherheit, Gerechtigkeit, Diskurs: Kriterien, Verfahren und Gründe für die Endlagersuche“ (CAU Kiel, Lehrstuhl für Philosophie und Ethik der Umwelt)	392

5.3.2	AP „Verfassungsrechtliche Anforderungen und verwaltungsrechtliche Implikationen“ (TU Braunschweig, Institut für Rechtswissenschaften)	412
5.4	Transversalprojekt 4 - Interdisziplinäre Risikoforschung . .	447
5.4.1	Interdisziplinäre Risikoforschung	447
5.4.2	Vergleich der radiologischen Gefährdung für verschiedene Entsorgungsoptionen	453
5.4.3	Individuelle Dosimetrie für Beschäftigte in Entsorgungsanlagen	464
5.4.4	Radionuklidquellterme für verschiedene Entsorgungsoptionen	473
5.4.5	Einfluss der Radionuklidspeziation auf Transferfaktoren	487
5.4.6	Langzeitsicherheit von Tiefenlagern	489
5.5	Vertikalprojekt 5 - Endlagerung in tiefe geologische Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit	504
5.5.1	Arbeitspakete 5.1 und 5.2 (LfDG): Globalmodelle, Funktionalmodelle, Lokalmmodelle – Werkzeuge bei der Analyse des langfristigen Verhaltens von verschlossenen Endlagersystemen im Salinar- bzw. Tonsteingebirge	505
5.5.2	Arbeitspaket 5.3 (IELF-ES): Migrationsverhalten von Radionukliden	553
5.5.3	Arbeitspaket 5.3 (IELF-MGS): Hydrogeochemische Transport-Modellierung zur Schadstoffausbreitung im Deckgebirge über einem tiefen Endlager für radioaktive Abfälle	564
5.6	Vertikalprojekt 6 – Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit	598
5.6.1	Zielsetzung und Anpassungen	598
5.6.2	Institut für Grundbau und Bodenmechanik (TUBS) .	601
5.6.3	Institut für Werkstoffkunde (IW)	632
5.6.4	Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik - Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik (LfDG)	649
5.7	Vertikalprojekt 7 – Oberflächenlagerung	663
5.7.1	Zielsetzung des Teilprojektes	663
5.7.2	AP 7.1 „Bautechnische Konzepte“	664
5.7.3	AP 7.2 „Probabilistisches, monitoringbasiertes Sicherheits- und Life-Cycle2-Konzept“	682

5.7.4	AP 7.3 „Anforderungen aufgrund von Abfallbehandlungsmethoden“	695
6	Aus- und Weiterbildung	707
6.1	Studienangebote	707
6.2	Interne Aus- und Weiterbildung	709
6.3	Promotionsvorhaben	710
7	Forschungs- und Entwicklungsbedarf, Ausblick	711
7.1	Ausgangspunkte: Standortauswahlgesetz, Empfehlungen der Endlagerkommission und Erfahrungen des Verbundvorhabens ENTRIA	711
7.2	Governance und Technikfolgenabschätzung	714
7.3	Philosophische Ethik	716
7.4	Rechtswissenschaften	717
7.5	Endlagerauslegung und Rückholprozesse	718
7.6	Monitoring und Sicherheitsnachweis	719
8	Veröffentlichungen, Fachbeiträge, Bildungsangebote und öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen	724
8.1	Interdisziplinäre Veröffentlichungen	726
8.2	Disziplinäre Veröffentlichungen	735
8.3	Interdisziplinäre Fachbeiträge	751
8.4	Disziplinäre Fachbeiträge	759
8.5	Nachwuchsförderung / Aus- und Weiterbildung (interdisziplinär)	786
8.6	Nachwuchsförderung / Aus- und Weiterbildung (disziplinär)	788
8.7	Öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen und Bildungsangebote	796
	Abbildungsverzeichnis	813
	Tabellenverzeichnis	825
	Anhang: Risikokarte	827

1 Zusammenfassung

Die Entsorgung radioaktiver, insbesondere hoch radioaktiver Reststoffe betrifft die Gesellschaft als Ganzes und erfordert daher eine Forschung, die sowohl technologische und naturwissenschaftliche als auch gesellschaftliche Aspekte umfasst und diese disziplinübergreifend zusammenführt. Ausgehend von dieser Erkenntnis wurde das interdisziplinäre Verbundvorhaben ENTRIA, kurz für „Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen“, konzipiert. Es wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über den Zeitraum 01.01.2013 bis 30.06.2018 hinweg unter den Förderkennzeichen 02S9082A bis E (2013–2016) bzw. 15S9082A bis E (2017–2018) finanziert.

Inter- und transdisziplinäre Ansätze wurden bei der Forschung zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe in Deutschland bislang kaum verfolgt. ENTRIA ist als interdisziplinäres Vorhaben beantragt und bewilligt worden und unternimmt einen ersten Schritt, diese Forschungslücke zu schließen. Am Vorhaben waren zwölf Institute bzw. Fachbereiche deutscher Universitäten und Großforschungseinrichtungen sowie ein Partner aus der Schweiz beteiligt, die aus den Bereichen Natur-, Ingenieur-, Geistes-, Rechts-, Sozial- und Politikwissenschaften sowie aus dem Bereich Technikfolgenabschätzung Beiträge geleistet haben.

Die Vorhabenbeschreibung formuliert folgende strategischen Ziele:

- Schaffung von Grundlagen für den bewertungsorientierten Vergleich von Entsorgungsoptionen (Bewertungsgrundlagen),
- Förderung des wissenschaftlichen Austauschs und der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen mit der Entsorgung radioaktiver Reststoffe befassten Natur-, Ingenieur-, Geistes-, Rechts- und Sozialwissenschaftlern,
- Durchführung einschlägiger Forschung,
- disziplinäre und interdisziplinäre Aus- und Weiterbildung wissenschaftlichen Nachwuchses,
- Schaffung von Ausgangspunkten für gesellschaftliche Prozesse, die einer sicheren Entsorgung radioaktiver Reststoffe den Weg ebnen.

Der vorliegende Bericht wurde gemeinsam von allen Verbundpartnern erstellt und legt zusammenfassend die wichtigsten Arbeiten und Ergebnisse dar. Für Details zu den Forschungsarbeiten und -ergebnissen wird auf die zahlreichen Veröffentlichungen verwiesen, die im Schlusskapitel 8 dieses Berichts dokumentiert sind.

Übergeordnetes Forschungsthema des Vorhabens war die interdisziplinäre Entwicklung von Bewertungsgrundlagen für die drei wichtigen Entsorgungsoptionen:

- Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (wartungsfreie Tiefenlagerung),
- Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit (Tiefenlagerung mit Rückholbarkeit) und
- Langfristige Oberflächenlagerung.

Das Vorhaben ENTRIA war den betrachteten Entsorgungsoptionen entsprechend in drei Vertikalprojekten organisiert, die sich jeweils mit einer Option interdisziplinär befassten und die in erster Linie von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren bearbeitet wurden. Darüber hinaus wurden alle Optionen betreffende Aspekte der Ethik, Governance, Technikfolgenabschätzung, von Recht und Risikoforschung in Transversalprojekten interdisziplinär untersucht. Im Transversalprojekt 1 „Synthese, Koordination und Kommunikation“ (Sprecherprojekt) erfolgte die wissenschaftliche und administrative Koordination und die Zusammenführung der oben beschriebenen interdisziplinären Forschungsarbeiten. Darüber hinaus fielen projektinterne Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit in den Verantwortungsbereich des Sprecherprojekts.

Im Laufe des Vorhabens wurden verschiedene Methoden und Formen der interdisziplinären Zusammenarbeit, auch zwischen fachlich weit voneinander entfernten Disziplinen (z. B. naturwissenschaftlich-technischen Disziplinen einerseits sowie sozial- und geisteswissenschaftlichen Disziplinen andererseits) erfolgreich erprobt und angewendet.

Obwohl eine systematische Entwicklung, Etablierung und Bewertung gemeinsamer disziplinübergreifender Arbeitsmethoden nicht zu den Vorhabenzielen gehörte, wurden die wissenschaftstheoretischen Grundlagen, Erfahrungen und Schlussfolgerungen bezüglich der im Vorhaben experimentell eingesetzten interdisziplinären Arbeitsweisen und Kooperationsformen aufgrund ihrer Bedeutung für eine künftige interdisziplinäre Entsorgungsforschung in einer Prozessanalyse (siehe Kap. 3.1) und in einer Reihe von Veröffentlichungen dokumentiert.

Exemplarisch für die interdisziplinäre Kooperation steht u. a. die Untersuchung des Zusammenwirkens naturwissenschaftlich-technischer, rechtlicher und politischer Sachverhalte und der Rolle verschiedener Akteure bei der Festlegung und Anwendung von Grenzwerten im Strahlenschutz sowie die Untersuchung der Rolle von Grenzwerten in Zusammenhang mit der Entsorgung. Technische und gesellschaftliche Aspekte des Monitorings sowie Fragen von Governance und Analysen zur Gerechtigkeit waren Gegenstand weiterer solcher Kooperationen.

Während der Bearbeitungszeit des Vorhabens ENTRIA hat sich die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe mit der Frage der Entsorgungsoptionen befasst und ist in ihrem Abschlussbericht zu der Empfehlung einer „Endlagerung mit Reversibilität“ gelangt. Die Forschung im Vorhaben ENTRIA erfolgte unabhängig von der Kommissionsarbeit. Die am Vorhaben beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sehen ihre Arbeit und ihre Ergebnisse als einen auch über den Abschlussbericht der Kommission und die daran anschließende Novellierung des Standortauswahlgesetzes hinausgehenden, gültigen Beitrag zu einer „Prozessgestaltung als selbsthinterfragendes System“. Eine Parallele zur von der Kommission ausgesprochenen Empfehlung einer „Etappe 4: Beobachtung vor Verschluss des Endlagerbergwerks“ (im Vorhaben ENTRIA: „Offenhaltungsphase“) ist die ENTRIA-Untersuchung zu diesbezüglichen technischen Möglichkeiten und Zeiträumen.

Wissenschaftsethos und Interdisziplinarität geben die Vorgehensweise bei der Entwicklung von Bewertungsgrundlagen vor. Die Akzeptabilität von Entsorgungsoptionen bemisst sich an den Grundsätzen Sicherheit und Gerechtigkeit. Diese Aspekte sind miteinander verknüpft: So betreffen zum Beispiel die Fragen nach der Zumutbarkeit oder Akzeptabilität von Risiken oder nach deren „Verteilung“ (zwischen Bevölkerungsgruppen, zwischen Generationen) sowohl Aspekte der Sicherheit als auch der Gerechtigkeit.

In Hinblick auf den Grundsatz Sicherheit war der zentrale Beitrag des Vorhabens zu den Bewertungsgrundlagen eine vergleichende Risikobewertung. Hierzu war es notwendig, die Optionen konfigurativ auszugestalten. In interdisziplinärer Kooperation wurden naturwissenschaftlich-technische Grundannahmen zur Analyse der Optionen festgelegt, um sie exemplarisch mit Hilfe von Referenzkonzepten und -modellen zu untersuchen. Unter anderem wurden für die Option „Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit“ die Idee einer Überfahrungssohle zur Gewährleistung des Monitorings sowie generische Behälterkonzepte (ENCON) für die Einlagerung in verschiedenen Wirtsgesteinen entwickelt. Diese Konzepte

waren Gegenstand einer interdisziplinären Risikobewertung, in der die Entwicklung von kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten über die Zeit untersucht und in einer Risikokarte dargestellt wurde. Damit wurde eine Darstellungsform gewählt, die für Entscheidungsträger, insbesondere auch Politikerinnen und Politiker und Vertreter der interessierten Öffentlichkeit, aussagekräftig ist.

Zum Grundsatz Gerechtigkeit wurden Elemente der Optionen im Hinblick auf verschiedene „Gerechtigkeitskategorien“ (Prozessqualität, Verteilung, Bereitwilligkeit) analysiert und hinsichtlich einer umfassenden Entsorgungsstrategie eingeordnet und bewertet. Eine Aggregation der Untersuchungen und Ergebnisse zu einem in sich geschlossenem Bewertungskonzept erscheint nicht sinnvoll. Vielmehr müssen die Argumente Gegenstand gesellschaftlicher Diskurse und Entscheidungsprozesse werden. Mit der Kommissionsarbeit ist dies für Deutschland auf vorwiegend politischer Ebene geschehen und wird mit dem Nationalen Begleitgremium fortgesetzt und gesellschaftlich ausgeweitet. Letztlich vereint die Kommissions-Empfehlung Elemente der drei ENTRIA-Optionen. Ein reversibles und lernendes Verfahren wird auch weiterhin durch derartige Diskurse bestimmt werden. Aufschlussreich, wenn auch nicht notwendigerweise repräsentativ, sind diesbezüglich auch die Ergebnisse des im Transversalprojekt 3 mit Unterstützung anderer Transversal- und Vertikalprojekte durchgeführten Bürgerforums sowie der Delphi-Studie. Dies gilt auch im Hinblick auf eine künftige mögliche Ausrichtung transdisziplinärer Forschung.

Das Transversalprojekt 2 „Technikfolgenabschätzung und Governance“ befasste sich mit den Nebenfolgen von Technologien der Entsorgung und mit Möglichkeiten modernen Regierens. Ausgehend von einer Gegenwartsanalyse, einer Akteursanalyse sowie von Studien zum internationalen Vergleich erfolgten Forschungen zu Auswegen aus klassischen Dilemmata der Entscheidungsfindung, zur Mehrebenen-Governance und zu Konflikten in Zusammenhang mit der Entsorgungsproblematik. Der Governance-Begriff wurde erweitert, die Schnittstellen-Problematik zwischen formellem und informellem Governance-Prozess wurde erforscht. Eine Analyse der Politikinstrumente und Institutionen im Standortauswahlprozess wurde durchgeführt, als Hauptmerkmale der derzeitigen deutschen Situation wurden ein historisch gewachsenes Konfliktpotential einerseits und neue Handlungsmöglichkeiten andererseits (Standortauswahlgesetz als „window of opportunity“) herausgearbeitet.

Das Transversalprojekt 3 „Ethisch-moralische Begründung, rechtliche Voraussetzungen und Implikationen“ diente der Analyse der normativen Aspekte der Entsorgungsoptionen und des gesellschaftlichen Prozesses.

Bezogen auf die beiden Grundsätze Sicherheit und Gerechtigkeit widmete sich das Transversalprojekt vor allem der differenzierten Analyse von Gerechtigkeit und Freiwilligkeit. Aufgrund der Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes wurde ein ursprünglich für das Projektende geplantes Bürgerforum vorgezogen und kommunikativ mit der Kommissionsarbeit verbunden. Auch wenn die Methode keine repräsentativen Ergebnisse erzielen und keine breite Öffentlichkeitsbeteiligung ersetzen kann, eignet sie sich zur Evaluation von Chancen und Grenzen einer unvoreingenommenen Laienpartizipation und der Überprüfung wissenschaftlicher wie politischer Debattenbausteine hinsichtlich ihrer Plausibilität und Nachvollziehbarkeit. Eine Delphi-Studie diente insbesondere der Identifikation möglichst vieler unterschiedlicher Ansichten und Begründungsstrategien in Bezug auf zentrale Problematiken der Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe. Im Transversalprojekt erarbeitete Schlussfolgerungen betreffen u. a. die Aufnahme von Elementen der drei ENTRIA-Optionen in eine Entsorgungsstrategie, die Unvermeidlichkeit von Paternalismus bei der Zukunftsverantwortung, Trade-Offs zwischen Handlungsfreiheit und Sorgenfreiheit sowie naher und ferner Zukunft und die Problematik der nicht langfristig prognostizierbaren Zugriffssicherheit bei „Hüte“-Konzepten.

Während der Laufzeit des Vorhabens ergaben sich der Anlass und die Chance, auf die erstmalige Verabschiedung und danach die Novellierungen des Standortauswahlgesetzes einzugehen. Ein erster und bisher einziger juristischer Kommentar zum Standortauswahlgesetz 2013 wurde erarbeitet. Die weiteren Novellierungen des Gesetzes bis hin zu der umfänglichen Überarbeitung im Anschluss an die Empfehlungen der Endlager-Kommission wurden publizistisch begleitet. Das Regelungsdesign des Standortauswahlgesetzes folgt neuesten regulatorischen Konzepten im Sinne von „Governance as and by communication“, ohne dem in vollem Umfang Rechnung zu tragen. Allerdings wurde durch das Gesetz bisher keine alle Akteure erfassende kooperative Atmosphäre der Zusammenarbeit erreicht, weil es unter den üblichen Sachzwängen des Gesetzgebungsprozesses angefertigt wurde.

Das Transversalprojekt 4 „Interdisziplinäre Risikoforschung“ war vorwiegend auf Risiko und Sicherheit bei der Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe ausgerichtet. Im Transversalprojekt wurden sowohl Methoden entwickelt und angewendet, um eine vergleichende Risikobewertung vorzunehmen, als die radiologischen Belastungen von Beschäftigten und Bevölkerung untersucht, die für die drei genannten Entsorgungsoptionen zu erwarten sind. Diese Ergebnisse gehen in die Beurteilung des Gesamtrisikos von Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Reststoffe ein. Mit die-

ser Risikobewertung leistete das Transversalprojekt einen Beitrag zur vergleichenden Bewertung von Entsorgungsoptionen (s. o.). Außerdem wurden in einer Reihe von Arbeitspaketen wissenschaftliche Grundlagen, Methoden und Werkzeuge für Sicherheitsbewertungen entwickelt und exemplarisch angewendet.

Im Transversalprojekt wurde ein Softwarewerkzeug zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Tiefenlagern und damit zur vergleichenden Betrachtung und Bewertung von verschiedenen Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe im Hinblick auf den Schutz vor den von radio- und chemotoxischen Stoffen ausgehenden Gefahren und vor ionisierender Strahlung über lange Zeiträume geschaffen. Die potenzielle Freisetzung von Radionukliden aus den Endlagergebinden wurde auf Grundlage geochemischer Methoden quantifiziert. Während diese Modellierung im Nahfeld eines Endlagers greift, sind für die Abschätzung der Belastung der Bevölkerung Modellierungen der Biosphäre, also des Fernfeldes notwendig. Hierzu trägt die Untersuchung des Einflusses der Radionuklidspeziation auf Transferfaktoren zur Abschätzung der Ingestionsdosis bei. Oftmals werden in der Risikobewertung von Entsorgungsoptionen Expositionen der Beschäftigten bei Einlagerung bzw. ggf. Rückholung der Abfälle nicht oder nur unzureichend betrachtet. Um die daraus erwachsenden Risiken in einen Gesamtvergleich der Optionen einbeziehen zu können, wurde die Strahlenexposition von Beschäftigten zwischen den Entsorgungsoptionen der Tiefenlagerung ohne bzw. mit Rückholung modelliert.

Im Vertikalprojekt 5 „Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit“ wurden im Hinblick auf die Arbeit der Transversalprojekte die naturwissenschaftlich-technischen Grundlagen und die konzeptionellen Aspekte der Entsorgungsoption in einer Form beschrieben, die als Arbeits- und Diskussionsgrundlage sowohl für Spezialisten als auch für Vertreter nicht-technischer Disziplinen geeignet ist. Es erfolgte eine numerische Analyse fluiddynamisch relevanter Prozesse für Endlager in Tonstein- und in Steinsalzformationen, die Relevanz dieser Prozesse (einschließlich Gasbildung) für die Barrierenintegrität wurde untersucht. Auf der Basis der berechneten Fluidströme wurde das Migrationsverhalten von Radionukliden in Referenzmodellen simuliert. Hierbei kam die im Rahmen des Transversalprojekts 4 entwickelte Software zum Einsatz. Das Arbeitsprogramm wurde während des Vorhabens dahin gehend geändert, dass diese Berechnungen auch für die Option „Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit“ erfolgten, um so die Stoffströme für verschiedene Referenzmodelle zu vergleichen. Weiterhin wurden Laborarbeiten zur Stützung des Prozessverständnisses und zur Weiterent-

wicklung von Stoffgesetzen sowie zu hydrogeochemischen Prozessen im Wirtsgestein Steinsalz und im Deckgebirge durchgeführt.

Im Vertikalprojekt 6 „Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit“ wurde die Rückholoption in unterschiedlichen Wirtsgesteinen und Teufen unter den Prämissen der Langzeitsicherheit und der sicheren Zugänglichkeit der Abfälle untersucht. Durch die vielen denkbaren Varianten der Auslegung eines Tiefenlagers ergibt sich eine mehrdimensionale Abhängigkeitsmatrix, die für die vergleichende Betrachtung unterschiedlicher Wirtsgesteine durch ein generisches Tiefenlagermodell vereinfacht wurde. Endlagerkonzepte mit Rückholoption wurden geotechnisch bewertet und die geotechnischen und geomechanischen Fragestellungen bezüglich der Rückholbarkeit bearbeitet. Weiterhin wurde das monitoringbasierte Life-Cycle-Engineering geotechnischer Schutzsysteme in Tiefenlagern mit Rückholbarkeit untersucht. Konzepte für Monitoringprogramme für die entwickelten Tiefenlagermodelle wurden unter Berücksichtigung des Betrachtungszeitraums entwickelt. Anschließend wurde die Interaktion der geotechnischen Erfordernisse des Life-Cycle-Engineerings und der risikoanalytischen Betrachtung von Tiefenlagern mit Rückholoption aufbauend auf den Ergebnissen der obengenannten Arbeiten untersucht. Weiterhin wurden die am Behältersystem auftretenden Wechselwirkungen für unterschiedliche Endlageroptionen in Abhängigkeit der spezifischen Randbedingungen betrachtet. Hieraus wurden unter besonderer Berücksichtigung werkstofftechnischer Aspekte Konzepte zum Monitoring der technischen Barriere für unterschiedliche Endlageroptionen abgeleitet. Es wurden Randbedingungen einer sicheren Rückholbarkeit der Abfallgebinde aus dem Tiefenlager benannt und technische Konzepte zu Freilegung, Handhabung und Transport der rückzuziehenden Behälter entwickelt.

Im Vertikalprojekt 7 „Oberflächenlagerung“ wurden ausgehend von einer Analyse existierender Zwischenlagersysteme sowie einschlägiger Regelwerke mögliche Einwirkungen auf Oberflächenlager-Bauwerke untersucht, Prognosen zur Werkstoffentwicklung erstellt, diesbezügliche Mess- und Monitoringmethoden sowie anlagenbezogene Monitoring- und Life-Cycle-Konzepte bewertet und Empfehlungen für die Gestaltung einer längerfristigen Oberflächenlagerung entwickelt. Es stellt sich die Frage, ob und in welcher Weise die der Oberflächenlagerung zugrunde liegenden Mehrbarrierensysteme durch eine robustere Gestaltung der Bauwerke zu stärken sind. Gleiches gilt für Konditionierungsanlagen.

Oberflächenlagerung ist zwar prinzipiell auch für unbegrenzte Zeiträume und damit als scheinbar endgültige Entsorgungslösung denkbar

(„Hütekonzzept“), existierende bzw. bislang systematisch untersuchte technische Konzepte erstrecken sich jedoch auf Lagerzeiträume über Jahrzehnte bis hin zu wenigen Jahrhunderten. Unter dieser Voraussetzung ist die Oberflächenlagerung nicht eine endgültige Lösung, sondern entsprechend der Terminologie der Internationalen Atomenergieorganisation eine „Maßnahme mit der Intention der Rückholung“. Die im Vorhaben ENTRIA betrachtete Oberflächenlagerung über Zeiträume über die bislang geplanten hinaus kann entweder als Vorstufe zu einer Tiefenlagerung oder Endlagerung, weil deren Implementierung mehr Zeit in Anspruch nimmt als bislang geplant, oder als Vorstufe zu einer bislang noch nicht bekannten Entsorgungslösung von Interesse sein. Im ersten Fall handelt es sich bei den längeren Lagerzeiten um einen notwendigen bzw. äußeren Zwängen geschuldeten Umstand, im zweiten Fall um einen aktiv und bewusst herbeigeführten.

Im Vorhaben erfolgte disziplinäre und interdisziplinäre Aus- und Weiterbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses, die weit über die für Forschungsvorhaben übliche Förderung (z. B. im Rahmen von Promotionsvorhaben) hinaus ging. ENTRIA-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler engagierten sich in einer Vielzahl von Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen für Externe sowie in öffentlichen Veranstaltungen.

2 Einleitung

ENTRIA, kurz für „Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen“, war ein Verbundvorhaben von zwölf Instituten bzw. Fachbereichen deutscher Universitäten und Großforschungseinrichtungen sowie einem Partner aus der Schweiz. Es wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über den Zeitraum 01.01.2013 bis 31.12.2017 hinweg unter den Förderkennzeichen 02S9082A bis E (2013–2016) bzw. 15S9082A bis E (2017–2018) finanziert. Für einige Verbundpartner wurde das Vorhaben bis zum 30.06.2018 kostenneutral verlängert.

Das Vorhaben wurde ausgehend von der Erkenntnis konzipiert, dass die Entsorgung radioaktiver, insbesondere hoch radioaktiver Reststoffe die Gesellschaft als Ganzes betrifft und daher nach Forschung verlangt, die sowohl technologische und naturwissenschaftliche als auch gesellschaftliche Aspekte umfasst und disziplinübergreifend zusammenführt. Entsprechend ist ENTRIA als interdisziplinäres Vorhaben beantragt und bewilligt worden. Inter- und transdisziplinäre Ansätze wurden bei der Forschung zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe in Deutschland bislang kaum verfolgt. ENTRIA hat einen ersten Schritt unternommen, diese Forschungslücke zu schließen. ENTRIA ist jedoch nicht mit dem Anspruch angetreten, gemeinsame disziplinübergreifende Arbeitsmethoden zu entwickeln oder zu etablieren. Im Rahmen des Projekts ist eine systematische und verallgemeinerbare Entwicklung von Ansätzen oder Methoden und deren zentral gesteuerte Umsetzung nicht leistbar. Ein Anspruch dieser Art ist angesichts des einschlägigen Forschungsstandes auch nicht plausibel zu begründen. Vielmehr wurden interdisziplinäre Arbeitsweisen und Kooperationsformen experimentell eingesetzt. Interdisziplinarität manifestierte und entwickelte sich in der Arbeit am konkreten Gegenstand und der gemeinsamen Beratung erzielter Ergebnisse.

Am Vorhaben waren zwölf Institute bzw. Fachbereiche deutscher Universitäten und Großforschungseinrichtungen sowie ein Partner aus der Schweiz aus den Bereichen Natur-, Ingenieur-, Geistes-, Rechts-, Sozial- und Politikwissenschaften sowie aus dem Bereich Technikfolgenabschätzung beteiligt:

- Institut für Endlagerforschung / Fachgebiet Endlagersysteme (IELF-ES), Technische Universität Clausthal
- Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (IRS), Leibniz Universität Hannover
- Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruher Institut für Technologie
- Forschungszentrum für Umweltpolitik (FFU), Freie Universität Berlin
- Lehrstuhl für Philosophie und Ethik der Umwelt – Philosophisches Seminar (LPEU), Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
- Institut für Rechtswissenschaften (IRW), Technische Universität Braunschweig
- risicare GmbH, Zollikerberg, Schweiz
- Institut für Nukleare Entsorgung (INE), Karlsruher Institut für Technologie
- Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik / Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik (LfDG), Technische Universität Clausthal
- Institut für Endlagerforschung / Fachgebiet Mineralogie, Geochemie, Salzlagerstätten (IELF-MGS), Technische Universität Clausthal
- Institut für Grundbau und Bodenmechanik (IGB), Technische Universität Braunschweig
- Institut für Werkstoffkunde (IW), Leibniz Universität Hannover
- Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Technische Universität Braunschweig

Die genannten Einrichtungen haben unterschiedliche Organisationsformen (z. B. Fachgebiete, Institute), waren aber innerhalb des Vorhabens gleichberechtigte Partner. Wie in der Verbundforschung üblich, wurden vom Zuwendungsgeber mehrere Zuwendungsbescheide ausgestellt. Alle Partner hatten einen Kooperationsvertrag abgeschlossen.

Die Vorhabenbeschreibung formuliert folgende strategischen Ziele:

- Schaffung von Grundlagen für den bewertungsorientierten Vergleich von Entsorgungsoptionen (Bewertungsgrundlagen),
- Förderung des wissenschaftlichen Austauschs und der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen mit der Entsorgung radioaktiver Reststoffe befassten Natur-, Ingenieur-, Geistes-, Rechts- und Sozialwissenschaftlern,
- Durchführung einschlägiger Forschung,
- disziplinäre und interdisziplinäre Aus- und Weiterbildung wissenschaftlichen Nachwuchses,
- Schaffung von Ausgangspunkten für gesellschaftliche Prozesse, die einer sicheren Entsorgung radioaktiver Reststoffe den Weg ebnen.

Übergeordnetes Forschungsthema des Vorhabens war die interdisziplinäre Entwicklung von Bewertungsgrundlagen für die drei wichtigen Entsorgungsoptionen:

- Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (wartungsfreie Tiefenlagerung),
- Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit (Tiefenlagerung mit Rückholbarkeit) und
- Langfristige Oberflächenlagerung.

Den betrachteten Optionen entsprechend war das Vorhaben in drei Vertikalprojekten (VP) organisiert, die sich jeweils mit einer Entsorgungsoption interdisziplinär befassten und alle in erster Linie von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren bearbeitet wurden. Darüber hinaus wurden alle Optionen betreffende Aspekte der Ethik, Governance, Technikfolgenabschätzung, des Rechts und der Risikoforschung in Transversalprojekten (TP) interdisziplinär untersucht. Die Transversalprojekte waren daher in besonderer Weise, wissenschaftsübergreifend, interdisziplinär angelegt (Abbildung 2.1). Zur wissenschaftlichen Begleitung der Plattform wurde ein Beirat gebildet. Seine vorrangige Funktion bestand darin, die Arbeit der Plattform kritisch zu begleiten und Hinweise für die Planung und Durchführung von Symposien und Workshops zu liefern. Die Empfehlungen des Beirats wurden veröffentlicht (https://www.entria.de/beirat_empfehlungen.html). Das Vorhaben ist im Jahr 2017 evalu-



Abbildung 2.1: ENTRIA-Projektstruktur.

iert worden¹. Die Ergebnisse wurden in einem Bericht des Projektträgers GRS zusammengefasst².

Durch die Realisierung des Standortauswahlgesetzes (StandAG) veränderte sich auch die Situation des Vorhabens ENTRIA. So gehörte zu den Aufgaben der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe nach § 3 StandAG (kurz: Endlagerkommission) z. B. die Befassung mit Fragen der Rückholbarkeit und mit Entsorgungsmöglichkeiten jenseits der Einlagerung in tiefen geologischen Formationen sowie damit verbunden einer längerfristigen oberirdischen Zwischenlagerung. Die Endlagerkommission ist in ihrem Abschlussbericht zu der Empfehlung einer „Endlagerung mit Reversibilität“ gelangt. Es ergaben sich also Berührungspunkte und Parallelen zwischen Kommissionsarbeit und ENTRIA-Forschungsprogramm. Aus der durch das Standortauswahlgesetz veränderten Situation ergaben sich neue Fragestellungen, insbesondere im nicht-technischen Bereich. Dies führte zu einer modifizierten Ausrichtung einzelner Module und Kooperationen sowie auch zu Möglichkeiten transdisziplinären Agierens. Die Forschung im Vorhaben ENTRIA erfolgte während der gesamten Laufzeit unabhängig von der Kommissionsarbeit. Im Vorhaben wurde Forschung im akademischen Umfeld durchgeführt, jedoch keine Politikberatung. Die am Vorhaben beteiligten Wissenschaft-

¹Röhlig K.-J. et al. (2017): Bericht zur Evaluierung des Forschungsvorhabens ENTRIA. Interner Bericht.

²GRS (2017): Evaluierung des Verbundprojektes ENTRIA. Bericht des Projektträgers GRS. Interner Bericht.

lerinnen und Wissenschaftler sehen ihre Arbeit und ihre Ergebnisse als Hinweise, die über den Abschlussbericht der Kommission und die daran anschließende Novellierung des Standortauswahlgesetzes hinaus eine „Prozessgestaltung als selbsthinterfragendes System“ befördern.

Der vorliegende Bericht wurde gemeinsam von allen Verbundpartnern erstellt und legt zusammenfassend die wichtigsten Arbeiten und Ergebnisse dar. Für Details zu den Forschungsarbeiten und -ergebnissen wird auf die Veröffentlichungen verwiesen, die im Schlusskapitel dieses Berichts dokumentiert sind. Entsprechend der Vielfalt der am Vorhaben beteiligten Disziplinen besteht auch eine Vielfalt hinsichtlich der Forschungsansätze und -kulturen sowie der Darstellung von Forschungsarbeiten und -ergebnissen und der dabei verwendeten Terminologie. Es kann nicht das Ziel eines interdisziplinären Verbundvorhabens sein, diesbezügliche Unterschiede zu eliminieren oder zu verdecken. Vielmehr fanden Verständigungen zu unterschiedlichen Ansätzen und Terminologien und Öffnungen im Hinblick auf die Erarbeitung gemeinsamer Ergebnisse statt. Die Vielfalt von Ansätzen, Darstellungsformen und Terminologien spiegelt sich daher auch bis zu einem gewissen Grad in dem vorliegenden, von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aller beteiligten Einrichtungen verfassten Bericht wider.

Die Gliederung des Abschlussberichts wurde in einem mehrstufigen iterativen Prozess entwickelt, der die im Forschungsvorhaben erarbeiteten Inhalte zur Grundlage hatte. Dabei waren alle ENTRIA-Partner wiederholt an der Strukturierung des Abschlussberichts beteiligt. Dem besonderen Stellenwert, den die interdisziplinäre Zusammenarbeit in ENTRIA einnahm, wird im Abschlussbericht durch die herausgehobene Darstellung ausgewählter interdisziplinärer Analysen in Kapitel 3 Rechnung getragen. Sie bilden die Grundlagen für die in Kapitel 4 dargestellte Befassung mit Bewertungsgrundlagen. Die disziplinären Ergebnisse der Arbeitsgruppen in den Transversal- und Vertikalprojekten, die die Basis für die interdisziplinären Analysen von ENTRIA bildeten, werden im Kapitel 5 ausführlich behandelt. Hier werden auch interdisziplinäre Arbeiten dargestellt, soweit diese nicht bereits in den Kapiteln 3 und 4 dargelegt wurden.

Ein Vorhabenziel war die disziplinäre und interdisziplinäre Aus- und Weiterbildung wissenschaftlichen Nachwuchses, die über die für Forschungsvorhaben im akademischen Bereich übliche Ausbildung sowohl im Umfang als auch bezüglich der Inhalte deutlich hinausging. Neben den in Zusammenhang mit der Forschungstätigkeit durchgeführten Promotionsverfahren spielten auch Gastaufenthalte von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, Doktorandenkolloquien und die gemeinsame Be-

treuung von Seminar-, Studien- und Masterarbeiten in der universitären Ausbildung von Studierenden eine wichtige Rolle. Außerdem stellten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eine Reihe von Bildungsangeboten für Studierende (sowohl an den an ENTRIA beteiligten als auch an anderen Hochschulen) bereit.

In Kapitel 6 werden die vielfältigen im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen beschrieben. In Kapitel 7 werden die sich aus den Forschungsarbeiten ergebenden Schlussfolgerungen zum Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufgezeigt.

Mit der Arbeit der Endlagerkommission und der Novellierung des StandAG verbunden erhöhte sich bei Administration, Stakeholdern und zivilgesellschaftlichen Organisationen das Interesse am Vorhaben. Für die ENTRIA-Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ergaben sich so immer wieder Notwendigkeiten und Chancen, der interessierten Öffentlichkeit die Rolle akademischer Forschung zu verdeutlichen.

Die Kommunikation mit Interessengruppen, Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit gehörte entsprechend der Vorhabenbeschreibung zu den Zielen des Vorhabens. ENTRIA-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler traten in einer Vielzahl von Vortragsveranstaltungen, Podiumsdiskussionen und anderen öffentlichen Veranstaltungen auf. Eine Reihe dieser Veranstaltungen mit Außenwirkung wurde von interdisziplinär zusammengesetzten ENTRIA-Teams durchgeführt bzw. unterstützt. Hier entstand ein besonderer Mehrwert sowohl für das jeweilige Publikum als auch für die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler: Einerseits wurde den Teilnehmerinnen und Teilnehmern ein umfassender Einblick in sehr unterschiedliche Facetten der Entsorgungsproblematik gegeben. Andererseits war die Vorbereitung und Durchführung für die Durchführenden selbst – oftmals waren dies Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler – ein Lernprozess zu Grundlagen, Methoden und Ergebnisdarstellungen anderer Disziplinen. In Kapitel 8 werden die im Vorhaben ENTRIA oder unter ENTRIA-Beteiligung erarbeiteten Veröffentlichungen und Vorträge sowie die öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen und Bildungsangebote für Externe aufgezählt, die im Rahmen des Vorhabens veranstaltet wurden bzw. zu denen Beiträge geleistet wurden.

3 Interdisziplinäre Analysen

3.1 Prozessanalyse

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle betrifft die Gesellschaft als Ganzes und verlangt daher nach Forschung, die sowohl technologische und naturwissenschaftliche als auch gesellschaftliche Aspekte umfasst und disziplinübergreifend zusammenführt. ENTRIA ist als interdisziplinäres Vorhaben beantragt und bewilligt worden. Inter- und transdisziplinäre Ansätze wurden bei der Forschung zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe in Deutschland bislang kaum verfolgt. ENTRIA unternimmt einen ersten Schritt, diese Forschungslücke zu füllen.

Übergeordnetes Forschungsthema des Vorhabens war die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen für die drei im Vorhaben untersuchten Entsorgungsoptionen, deren unterschiedliche Aufgaben und Möglichkeiten im Vorhaben betrachtet wurden.

3.1.1 Voraussetzungen und Ausgangslage

Im Vorhaben ENTRIA wurden Analysen durchgeführt, die das Erarbeiten disziplinärer Ergebnisse ebenso einschließt wie das Erarbeiten vernetzter Ergebnisse, die im Kern interdisziplinär sind und ohne die Kooperation und Koordination mit benachbarten, aber auch thematisch weit voneinander entfernten Disziplinen nicht möglich wären. Insbesondere das Zusammenwirken weit voneinander entfernter Disziplinen (z. B. naturwissenschaftlich-technischer Disziplinen einerseits sowie sozial- und geisteswissenschaftlicher Disziplinen andererseits) stellt in der deutschen Entsorgungsforschung ein Novum dar und ist mit vielfältigen Herausforderungen verbunden, auf die im Folgenden eingegangen wird.

3.1.2 Dynamik des Forschungsgegenstandes, Erwartungen von außen

Durch die Realisierung des Standortauswahlgesetzes (StandAG, 2013) veränderte sich auch die Situation des Vorhabens ENTRIA. So gehört zu

den Aufgaben der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe nach § 3 StandAG z. B. die Befassung mit Fragen der Rückholbarkeit und mit Entsorgungsmöglichkeiten jenseits der Einlagerung in tiefen geologischen Formationen sowie damit verbunden einer längerfristigen oberirdischen Zwischenlagerung; es ergaben sich also Berührungspunkte und Parallelen zum ENTRIA-Forschungsprogramm. Damit verbunden erhöhte sich bei Administration, Stakeholdern und zivilgesellschaftlichen Organisationen das Interesse an der Arbeit der Forschungsplattform. Für die ENTRIA-Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ergab sich so bereits früh die Notwendigkeit, der interessierten Öffentlichkeit die Rolle akademischer Forschung darzulegen und Erwartungshaltungen hinsichtlich unmittelbarer politischer Verwertbarkeit der Ergebnisse zu begegnen. Diese Fragen waren auch Gegenstand der Präsentation und Diskussion des Vorhabens in der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe.

Aus dem durch das Standortauswahlgesetz veränderten Umfeld resultierten neue Fragestellungen, insbesondere im nicht-technischen Bereich. Seitens der Forschungsplattform wurde darauf durch die Anpassung einzelner Module, die Initialisierung neuer Kooperationen, auch zu den Möglichkeiten und Grenzen transdisziplinärer Forschung, reagiert. Als beispielhaft soll hier das im Transversalprojekt 3 geplante Bürgerforum genannt werden. Es wurde deutlich früher als geplant und mit verändertem Kontext durchgeführt. Im Bürgerforum wurden Einschätzungen von Laien aufgenommen, von diesen in einem Bürgergutachten dokumentiert und argumentiert und die Ergebnisse der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe zur Verfügung gestellt. Das Bürgerforum wurde im Vorhaben anschließend wissenschaftlich ausgewertet.

3.1.3 Projektfortschritt und vorgenommene Anpassungen

Einordnung längerfristige Oberflächenlagerung als Teil einer durchdachten Entsorgungsstrategie

Aus der Erkenntnis heraus, dass die Option Oberflächenlagerung nicht das Kriterium einer abschließenden Entsorgungsoption erfüllt und den anderen beiden Optionen somit nicht gleichwertig gegenübergestellt werden kann, erfolgte eine interdisziplinäre Auseinandersetzung über die Einordnung der Oberflächenlagerung in eine Entsorgungsstrategie.

Ein Oberflächenlager wird unabhängig von seinem Design und seiner technischen Lebensdauer immer auf menschliches Handeln angewiesen sein. Eine Dauerlagerung (Wildi u. a., 2000) über mehrere Jahrhunderte

an der Erdoberfläche ist nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik nur durch eine stetig durchzuführende Instandhaltung und durch im Abstand von maximal wenigen Jahrhunderten zu erstellende Neubauten möglich (NRC, 2014). Ob der Menschheit zukünftig die benötigten Ressourcen zur Bewältigung dieser Aufgabe zur Verfügung stehen werden bzw. ob die Menschen überhaupt Ressourcen für das vererbte Abfallproblem einsetzen wollen, kann heute nicht vorhergesagt werden.

Zu besonders verheerenden Auswirkungen könnte eine an der Erdoberfläche angesiedelte Lagerung hoch radioaktiver Reststoffe im Kriegsfall führen. Der physische Schutz, den beispielsweise ein verschlossenes Endlager in einigen hundert Metern Tiefe aufweisen würde, kann durch ein Oberflächenlager nicht erreicht werden. Die gelagerten Reststoffe könnten zerstört und freigesetzt oder für militärische Zwecke entwendet werden.

Zusammengefasst ist die Oberflächenlagerung stetig auf den Einsatz menschlicher und finanzieller Ressourcen angewiesen und birgt im Kriegsfall ein besonders hohes Risiko. Sie ist dementsprechend und im Vergleich mit einem Tiefenlager abzulehnen (Ott u. Budelmann, 2017).

Wird die Oberflächenlagerung hingegen als komplementäre und nicht als konkurrierende Option der beiden anderen im ENTRIA-Projekt untersuchten Optionen (oder einer heute unbekannten Option) betrachtet, rücken andere Aspekte in den Vordergrund. Die maßgebende Frage lautet: „Wie lange werden die Zwischenlager betrieben?“

Die Oberflächenlagerung ist auch nach etwa 70 Jahren Kernenergienutzung und Abfallproduktion immer noch der Status quo für die Lagerung hoch radioaktiver Reststoffe. Die zahlreichen Bemühungen von Kernenergie nutzenden Ländern zur Realisierung eines betriebsbereiten Endlagers sind bereits gescheitert oder noch unvollendet. Die Entscheidungen der nachfolgenden Generationen bezüglich der Endlagerung sind genauso wenig vorhersagbar wie der Wille zur Instandhaltung und Neuerrichtung von Oberflächenanlagen. Die Intention zur Oberflächenlagerung wird währenddessen kontrovers diskutiert (Köhnke u. a., 2017b). Mit Verweis auf die Notwendigkeit, den Handlungsdruck zur Realisierung eines Tiefenlagers aufrechtzuerhalten, wird vielfach eine möglichst kurzfristige Zwischenlagerung empfohlen (ESK, 2015; TÜV, 2015; Alt u. a., 2017). Unvorhergesehene Verzögerungen bei Endlagerprojekten können dann allerdings in einem schwer aufzulösenden Spannungsfeld zwischen Aufrechterhaltung des Handlungsdrucks und gebotener Vorsorge münden. Wird die Möglichkeit längerer Nutzungszeiträume trotz der weltweiten Erfahrungen mit Rückschritten bei der Standortauswahl für Endlager bewusst außer Acht gelassen, lässt sich das schlecht mit der Forderung nach

Generationengerechtigkeit vereinbaren – den nachfolgenden Generationen wird neben einer geringeren Robustheit der Zwischenlager ein möglicherweise erheblicher Instandhaltungsaufwand zugemutet (Riemann u. Köhnke, 2016; Köhnke, 2017; Riemann, 2017).

In den USA, Großbritannien, Frankreich und den Niederlanden wurde, ähnlichen Argumenten folgend und nach gescheiterten Versuchen, ein Endlager zu realisieren, beschlossen, künftig vornehmlich langfristige Zwischenlager zu errichten, die für eine mindestens hundertjährige Lagerung ausgelegt sind. Dadurch soll die Robustheit der Entsorgungsstrategie erhöht werden, um auf mögliche Rückschritte und Haltepunkte vorbereitet zu sein (Budelmann u. a., 2017; Köhnke u. a., 2017a).

Der Entstehungsprozess der generischen ENCON-Behälterkonzepte

Die generischen ENCON-Behälterkonzepte stellen eines der Ergebnisse von ENTRIA dar, welches aus der interdisziplinären Zusammenarbeit vieler Institute innerhalb des ENTRIA-Teams entstanden ist. Die beiden Arbeitspakete 6.5 und 6.6 des Instituts für Werkstoffkunde befassen sich mit Interventionstechniken zur Rückholung sowie Verfahren zum Monitoring der technischen Barriere. Die potentiell im Rahmen der Tiefenlagerung zum Einsatz kommenden Behälter stellen eine der wichtigsten Randbedingungen dieser beiden Teilprojekte dar. Somit war es zu Beginn der Projektlaufzeit zwingend erforderlich, Informationen zu international für den Einsatz in unterschiedlichen Tiefenlagern vorgesehenen Behälter zusammenzutragen. Die Betrachtung der im Ausland verfolgten Konzepte verdeutlicht die erhebliche Bandbreite der vorgesehenen technologischen Lösungen. Die Vielzahl dieser Lösungen ergibt sich aus den jeweiligen nationalen Randbedingungen und den Anforderungen der dort vorgesehenen Tiefenlagerlösung. Hieraus resultiert allerdings auch die Herausforderung, identifizierte Lösungsansätze auf die Randbedingungen der ENTRIA-Optionen zu übertragen. Allerdings ist hierbei der Konflikt zu beachten, dass die Bewertung von Einlagerungsoptionen einerseits nicht auf der Grundlage spezifischer Standorte erfolgen soll, andererseits aber die wirtsgesteinsspezifischen Besonderheiten berücksichtigt werden müssen. Insbesondere das für ein Tiefenlager gewählte Wirtsgestein besitzt einen erheblichen Einfluss auf die Gestaltung der Behälter und daraus resultierend auch auf die konkrete Lagerplanung. Dieser Konflikt wurde im Rahmen der Präsentation erster Arbeitsergebnisse das erste Mal im Kreis der Bearbeiter von ENTRIA dargelegt.

Die weitere Auseinandersetzung mit dieser Problemstellung führte zu dem Schluss, dass es nicht möglich ist, alle zur Bearbeitung der Arbeitspa-

kete erforderlichen Daten aus den zumeist standortspezifischen internationalen Behälterkonzepten zu entnehmen. Einige der Randbedingungen dieser Konzepte, wie beispielsweise die Art und die Menge des einzulagernden radioaktiven Inventares, aber auch die rechtlichen Randbedingungen der Einlagerung, weichen teils erheblich von den in Deutschland gegebenen Randbedingungen ab. Ein direkter Transfer auf die ENTRIA-Optionen ist somit nicht möglich. Trotz der zu diesem Zeitpunkt unzureichenden Datenbasis ist das Behälterkonzept ein wesentlicher Bestandteil der Referenzkonzepte, die für den Optionenvergleich genutzt wurden. Die Gestaltung der Behälter beeinflusst nicht nur seine Handhabung sowie die Wechselwirkungen mit dem Wirtsgestein und der geotechnischen Barriere, sondern sie besitzt auch direkte Auswirkungen auf viele weitere Bereiche. Beispielsweise ist hier die Gestaltung des Tiefenlagers oder der betriebliche Strahlenschutz bei allen Vorgängen der Beladung, Pufferlagerung, Einlagerung und der eventuellen Rückholung/Bergung der Behälter zu erwähnen.

Die Diskussion führte in AP 6.5 und 6.6 zur Ausarbeitung von wirtsgesteinsspezifischen ENTRIA-Behälterkonzepten zur Lösung des Zielkonflikts auf der Grundlage des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik. Zusätzlich können diese generischen Behälterkonzepte auch einen wertvollen Beitrag zu den ENTRIA-Bewertungsgrundlagen leisten. Aufbauend auf dieser Motivation begann das IW damit, auf der Grundlage der bereits geleisteten Recherchearbeiten ein erstes Konzept zur Ausarbeitung generischer ENTRIA-Behälter für die unterschiedlichen Wirtsgesteine, die sogenannten ENCON-Behälter (ENTRIA-CONtainer), zu erstellen. Schnell zeigte sich, dass diese Aufgabe nicht von einer einzelnen Disziplin aus dem ENTRIA-Verbund alleine bearbeitet werden kann. So erfordert beispielsweise die Auslegung der Behälterabschirmung eine enge Zusammenarbeit mit den Kollegen aus dem Bereich der Kernphysik und des Strahlenschutzes. Die Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Behälter, Geotechnik und Geologie erfordert wiederum das disziplinäre Fachwissen der am Projekt beteiligten Wissenschaftler aus den jeweiligen Fachrichtungen. Die Erarbeitung von Behälterkonzepten als Beitrag für die Bewertungsgrundlagen des Optionenvergleiches erfordert somit die Beteiligung vieler an ENTRIA beteiligter Disziplinen. Im Rahmen des Entstehungsprozesses der ENCON waren Wissenschaftler der folgenden Disziplinen beteiligt:

- Werkstoffwissenschaften (IW, LUH)
- Kernphysik und Strahlenschutz (IRS, LUH)
- Geologie (IGB, TU BS)

- Endlagerforschung (IELF, TUC)
- Geomechanik (LfdG, TUC)
- Bauingenieurwissenschaften (iBMB, TU BS)
- Strahlenschutz (INE, KIT)
- Rechtswissenschaften (IRW, TU BS)
- Risikoforschung (INTAC)

In einem vom IW initiierten, interdisziplinären Workshop wurden von den einzelnen Institutionen zuerst die Anforderungen formuliert und Randbedingungen definiert, welche sich aus ihrer jeweiligen Sicht an einen Behälter ergeben. In mehreren Vorträgen und der anschließenden Diskussion wurden unter anderem Aspekte der Behälterhandhabung, der Auslegung eines Tiefenlagers, des Strahlenschutzes und der geologischen Randbedingungen der Einlagerung erörtert. In der gemeinsamen Diskussion konnten bereits einige Randbedingungen für die ENCON-Behälter definiert werden, da unter allen Bearbeitern ein breiter Konsens erzielt werden konnte. Da auf technische Aspekte des ENCON in den folgenden Kapiteln noch vertiefend eingegangen wird, werden an dieser Stelle daher nur einige exemplarische Aspekte dargestellt. Im Rahmen des Workshops konnte festgelegt werden, dass drei unterschiedliche Behälterkonzepte für die im Standortauswahlgesetz (StandAG, 2017) genannten Wirtsgesteinsgruppen Kristallin, Salz und Ton/Tonstein erforderlich sind. Diese Konzepte werden nachfolgend als ENCON-K (Kristallin), ENCON-S (Salz) und ENCON-T (Ton/Tonstein) bezeichnet. Die ENCON-Tiefenlagerbehälter für die unterschiedlichen Wirtsgesteine sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

Zusätzlich wurde festgelegt, dass auch für die Oberflächenlagerung ein entsprechender ENCON-Behälter, der sogenannte ENCON-TLB konzipiert werden soll. Die Behälterkonzepte zur Tiefenlagerung sollen sich, insbesondere bezüglich der zum Einsatz kommenden Materialien, an den Forschungsergebnissen internationaler Tiefenlagerprojekte in dem jeweiligen Wirtsgestein orientieren. In Deutschland werden, seit 2017 auch im Rahmen des StandAG, Vorkehrungen zur Erleichterung einer etwaigen Bergung der Behälter über einen Zeitrahmen von mehreren hundert Jahren gefordert. Aufgrund dieser Anforderung und der Rückholbarkeitsforderung in VP 6 konnte Einigkeit erzielt werden, dass alle ENCON als selbstabschirmende Behälter ausgelegt werden, deren Auslegungslbensdauer mindestens diesem Zeitrahmen entspricht. Weiterer

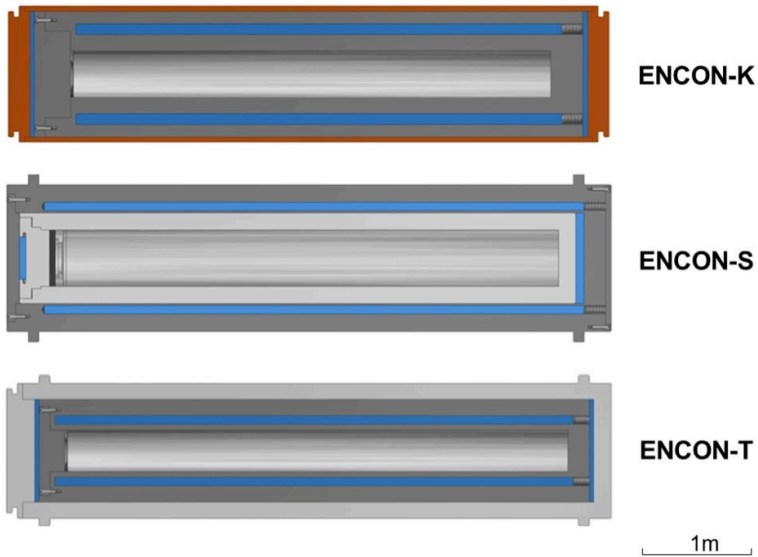


Abbildung 3.1: Darstellung der generischen ENCON-Tiefenlagerbehälter.

Konsens bestand darüber, dass die thermische Auslegung aller ENCON-Behälter auf der Grundlage des in Deutschland zur Tiefenlagerung vorgesehenen hoch radioaktiven Inventares erfolgen und sich an der Geologie der betreffenden Wirtsgesteinsvarianten orientieren muss. Anhand dieser Entscheidung konnte, basierend auf vorangegangenen Untersuchungen des IGB, die Wärmeleistung für die verschiedenen ENCON-Behälter bereits grob abgeschätzt werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen des Behälterworkshops wurden im Anschluss die technischen Details der Behälter in mehreren interdisziplinären Teams unter Koordination des IW ausgearbeitet. Beispielsweise wurde die wirtsgesteinsspezifische Wärmeleistung der Behälter in bilateraler Zusammenarbeit zwischen dem IW und dem IGB bestimmt und validiert. Hieraus konnte anschließend in Zusammenarbeit des IW mit dem IRS und dem INE das Inventar der Behälter abgeleitet werden. In der Folge wurden die erforderlichen Materialkombinationen und -stärken für die Behälter bestimmt. Da diese Teams immer nur einen Teil der an ENTRIA vertretenen Disziplinen umfasst haben, wurde der Ansatz verfolgt die Ergebnisse der Arbeiten der einzelnen Teams regelmäßig allen Bearbeitern zur Verfügung zu stellen. So wurde der Entwicklungsstand der ENCON-Behälter im

Rahmen verschiedener Bearbeitertreffen vorgestellt und diskutiert. Die abschließende Dokumentation der Ergebnisse der Entwicklung der ENCON-Behälterkonzepte erfolgte durch das Institut für Werkstoffkunde.

Vorziehen des Bürgerforums

Durch die geänderte Gesetzeslage und den Zeitrahmen der Kommissionsarbeit erschien es zwingend geboten, das ursprünglich für die Jahre 2016/2017 angesetzte Bürgerforum zeitlich vorzuziehen, um dessen Ergebnisse direkt in die politische Debatte einfließen zu lassen. Dies ist eines der zentralen Beispiele für die nicht dezidiert geplante transdisziplinäre Öffnung ENTRIAs, welche sich in zahlreichen öffentlichkeitswirksamen Beiträgen zeigte. Aus der Sicht einer Theorie deliberativer Demokratie kam es im „deliberativen Zwischenreich“ (Ott, 2014) zu einem diskursiven Kontakt zwischen einer neuen parlamentsnahen Institution (Endlagerkommission) und einem im Wissenschaftssystem generierten partizipativen Verfahren, für dessen Weiterentwicklung und Anpassung an das Thema der nuklearen Entsorgungspolitik ENTRIA-Forscherinnen und -Forscher verantwortlich waren.

Vom Prozess zu den Produkten

Informeller Austausch ist von großer Bedeutung für die interdisziplinäre Forschung, um gemeinsame Grundlagen zu finden. Gespräche dieser Art hatten entsprechenden Einfluss auf den allgemeinen Ertrag von ENTRIA. Exemplarisch sei hierfür auf drei zentrale Produkte verwiesen: Zunächst galt es, sich auf eine gemeinsame Problembeschreibung zu verständigen. Mit dem Memorandum (Röhlig u. a., 2014) (1) wurde der Grundstein gelegt, das Problem angemessen zu beschreiben und eine gewisse begriffliche Einigung zu erreichen — etwa in der Anerkennung des „wicked problems“, den Bedingungen akzeptabler Lösungsansätze und der Identifikation zentraler Spannungsfelder und Trade-Offs. Die Bewertungsgrundlagen (Kapitel 4) (2), welche in Arbeitspapieren über den gesamten Zeitraum weiterentwickelt wurden, nahm sich ENTRIA der normativen Dimensionen des Problems an, die auf den Säulen Wissenschaftsethik, Sicherheit und Gerechtigkeit ruht. Diese, in sich komplexen, Säulen wurden zum Teil zu Kriterien und Indikatoren spezifiziert. Auf diskursiver Ebene dienten Plädoyers und Gegenreden (Riemann u. Chaudry, 2018) (3) der Organisation der ansonsten unübersichtlichen Fülle verschiedenster Argumente für und wider spezifische Entsorgungsoptionen. Diese drei ENTRIA-Produkte bieten einen gemeinsamen Rahmen für die Einordnung der

detaillierten interdisziplinären und fachspezifischen Analysen und Publikationen des Verbundprojektes.

Prozess der interdisziplinären Zusammenarbeit, Auswertung und Kritik

Das Forschungsvorhaben ENTRIA war strukturell auf die Ermöglichung und Förderung interdisziplinärer Kooperation hin angelegt. Während innerhalb der Vertikalprojekte Wissenschaftler eng verwandter Disziplinen zu Entsorgungsoptionen forschten, behandelten die Transversalprojekte die Entsorgungsoptionen übergreifende Fragestellungen. Hier war interdisziplinäre Kooperation über die Grenzen verschiedener Wissenschaften deshalb in besonderem Maße gefordert und die Arbeitsgruppen der TP waren entsprechend disziplinär weit gefächert zusammengesetzt. Im Rahmen der Evaluierung wurden die Matrixstruktur des Projekts und die Leitungsstruktur positiv bewertet.

Neben den in der Struktur angelegten Schnittstellen entwickelte sich im Laufe des Projektes eine Vielzahl weiterer interdisziplinärer Vernetzungen und Veröffentlichungen. Die Erstellung interdisziplinärer Analysen gewann durch eine möglichst freie Kooperation der Projektpartner untereinander weil geschützte Räume für experimentelle Kooperationen hergestellt und die Berücksichtigung des Forschungsstandes sichergestellt wurden. Viele Fragestellungen erforderten Abstimmungsprozesse unter Beteiligung mehrerer Teilprojekte. Die Transversal- und Vertikalprojekte haben darüber hinaus für verschiedene gemeinsame Arbeiten bilateral zusammengearbeitet.

Die intensive Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern erforderte eine Reihe von Festlegungen, Absprachen, gemeinsamen Definitionen etc. Häufige Treffen, aber auch Telefon- und Videokonferenzen mussten im Terminkalender des Projekts untergebracht werden. Einen wichtigen Beitrag zur Vernetzung über die bestehenden Grenzen zwischen den Disziplinen hinweg leisteten die Bearbeitertreffen. Schon beim ENTRIA-Kick-off-Meeting in Goslar wurde die Notwendigkeit zu akademischer Selbstorganisation auf Mitarbeiterebene formuliert. Den Doktoranden und weiteren Projektmitarbeitern wurde durch dieses Instrument die Möglichkeit eingeräumt, an frei gewählten Themen zu arbeiten.

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter brachten einander im gegenseitigen Austausch die beteiligten Disziplinen, die von ihnen bearbeiteten Forschungsfragen, durchgeführten Arbeiten und Resultate näher, konnten ein Verständnis für die Forschungsinteressen und Arbeitsmethoden fremder Wissenschaften entwickeln und schließlich Anknüpfungspunkte, Überschneidungen und gemeinsame Interessen der ENTRIA-Forschung

benennen. Es wurde an Texten aus unterschiedlichen Disziplinen zu Grenzwerten, Problematik des Vertrauens in wissenschaftliche Expertise, Umgang mit Wissen und Nicht-Wissen gearbeitet.

Verschiedene Modi interdisziplinärer Zusammenarbeit wurden während der Projekttreffen, Bearbeitertreffen und Beiratstreffen genutzt, Formate zur Zusammenarbeit in ENTRIA entwickelt. Die gelungene projektinterne Vernetzung über die Struktur der Teilprojekte hinaus drückt sich in einer Reihe gemeinsamer interdisziplinärer Vorträge und Veröffentlichungen aus, die erst im Laufe des Vorhabens erdacht, konzipiert und umgesetzt wurden und ihrerseits zu einer Intensivierung der interdisziplinären Zusammenarbeit beitrugen.

Es muss bei einer Bewertung der interdisziplinären Zusammenarbeit in ENTRIA unterschieden werden zwischen im Vorfeld geplanten Arbeiten und Kooperationen, die erst im Projektverlauf entstanden. Von den Transversalprojekten wurden Arbeiten in einem vor Projektbeginn verabredeten Umfang gemeinsam bearbeitet. Unter anderem bedingt durch die dynamische Entwicklung der deutschen Entsorgungspolitik mussten diese Planungen an manchen Stellen angepasst werden. Solche Änderungen erfordern zum Teil kurzfristig flexibles Handeln; dies konnte aber im Fall von ENTRIA gut umgesetzt werden.

Die Fülle der Veröffentlichungen, Vorträge und anderen Ergebnisse von Kooperationen, die sich erst im Verlauf des Projekts entwickelt haben, spricht dafür, diese Art der freien akademischen Selbstorganisation im Rahmen eines großen Verbundprojekts zu ermöglichen und zu fördern. Dem sind jedoch in der Regel enge Grenzen gesetzt. Bei der Planung von Verbundprojekten wird der benötigte Aufwand an Zeit und finanziellen Mitteln für erfolgreiche interdisziplinäre Zusammenarbeit häufig zu gering eingeschätzt. Freiräume und Zeiten für die Diskussion inhaltlicher Fragen werden nicht in ausreichender Weise vorgesehen. Die Mitarbeiter werden primär für disziplinäre Aufgaben eingeplant. Interdisziplinarität wird als eine Selbstverständlichkeit angesehen, die sich ohne zusätzlichen Aufwand einstellt. Verkannt wird dabei, dass eine andere Vorgehensweise erfolgversprechender ist. Bei dieser wird zu Beginn innerhalb des Verbundprojektes ein Konsens darüber hergestellt, in welcher Form und in welchem Umfang solche freie Vernetzung gefördert werden soll. Mitarbeiter auf Promotionsstellen, die, je nach Disziplin, Universität etc. für drei bis fünf Jahre befristet beschäftigt werden, müssen in erster Linie die Anfertigung Ihrer Qualifizierungsarbeit im Blick haben. Häufig werden Doktoranden auf halben Stellen beschäftigt und investieren die gesamte bezahlte Arbeitszeit in die Projektarbeit. Um einen Anreiz zu schaffen, sich über die disziplinäre Arbeit im eigenen Institut hinaus zu engagie-

ren, sollte die Beschäftigung auf vollen Stellen, verbunden mit einer die interdisziplinäre Arbeit umfassenden Tätigkeitsbeschreibung, in der Regel eingeplant werden.

Es müssen für alle beteiligten Projektpartner Reisemittel in ausreichender Menge zur Verfügung stehen. Persönliche Treffen und Besprechungen können durch Telefonkonferenzen und E-Mail-Austausch nur mit Einschränkungen ersetzt werden. Eine klare thematische Ausrichtung von Veranstaltungen, die der Vernetzung dienen, ist notwendig. Der Bezug zum Projektziel muss dabei im Fokus bleiben. Beispiele aus der ENTRIA-Arbeit sind die TP-4-Treffen, die Autorenworkshops zu den Sammelbänden „Interdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe“ und „Technisches Monitoring und Governance“, die Abstimmungstreffen zu Referenzmodellen und die Bearbeitertreffen.

Interdisziplinäre Zusammenarbeit muss ein klares Ziel haben, beispielsweise eine Veröffentlichung. Gerade im deutschsprachigen Raum ist die Zahl der wissenschaftlichen Zeitschriften, die interdisziplinäre Ergebnisse zur Veröffentlichung annehmen, überschaubar. Unterstützung durch erfahrene Wissenschaftler der beteiligten Institutionen bei der Konzeption und Erstellung von Zeitschriftenbeiträgen, Sammelbänden etc. kann eine entscheidende Hilfe bei der Veröffentlichung der Ergebnisse interdisziplinärer Forschung sein.

Zusammenarbeit innerhalb der Transversalprojekte

Die Transversalprojekte (TP) stellten das verbindende Glied in ENTRIA dar. Ihre Aufgabe war es, die in den Vertikalprojekten (VP) untersuchten Entsorgungsoptionen unter politik- und gesellschaftswissenschaftlichen, umweltethischen und rechtlichen Gesichtspunkten und mit Bezug zu Fragen von Risiko und Sicherheit einander gegenüberzustellen. Damit waren die TP in besonderer Weise gefordert, ein Fundament für die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zu schaffen. Eine Sonderrolle nimmt das TP 1 ein, das keinen Forschungsauftrag, sondern die Synthese der Ergebnisse des Forschungsverbundes zu verantworten hatte.

Im TP 2 – Technikfolgenabschätzung und Governance – wurde der Schwerpunkt auf Governanceforschung gelegt. Bezug zu den Entsorgungsoptionen wurde über das Themenfeld Monitoring hergestellt sowie durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit zum Thema Grenzwerte (siehe Abschnitt 3.5), die in die Verfassung eines Thesenpapiers und weiteren Veröffentlichungen mündete. Das TP-2-Team wurde über die Projektlaufzeit problemorientiert durch ENTRIA-Kollegen anderer Teilprojekte erweitert.

TP 3 – Ethisch-moralische Begründung, rechtliche Voraussetzungen und Implikationen – entwickelte früh eine starke Kooperation mit VP 7, die zur ausführlichen Auseinandersetzung mit langfristiger Oberflächenlagerung führte. In mehreren Publikationen (Riemann u. Köhnke, 2016; Ott u. Budelmann, 2017; Riemann, 2017; Semper, 2017) und Vorträgen wurden normative Charakteristika und rechtliche Regulierungsbedarfe der Oberflächenlagerung erläutert und in den Kontext einer Entsorgungsstrategie gestellt. Dabei wurden Aspekte aller VP aufgegriffen und diskutiert. Die Befassung mit die Entsorgungsoptionen umspannenden ethischen und rechtlichen Aspekten führte zur Durchführung dreier Werkstattgespräche und Veröffentlichung resultierender Tagungsbände (Smeddinck u. König, 2016; Ott u. Smeddinck, 2018; Smeddinck, 2018). Die fachliche Verwandtschaft der beiden normativen Disziplinen Ethik und Recht eröffnete Anknüpfungspunkte für interdisziplinäre Analysen, etwa Zukunftsverantwortung, Verursacherprinzip, Freiwilligkeit. So stand das TP 3 in kontinuierlichem fachlichen Austausch. Es lieferte zudem wissenschaftstheoretische Beiträge und praktische Überlegungen zur notwendigen begleitenden Interdisziplinaritätsforschung.

Im TP 4 – Interdisziplinäre Risikoforschung – war das gleichnamige Arbeitspaket (AP) auf die vergleichende Bewertung von Risiken in Zusammenhang mit den drei untersuchten Optionen ausgerichtet. Zwischen Vertretern der VP und des AP fand periodisch ein fachlicher Austausch statt. Dabei wurden unter anderem Referenzmodelle für die untersuchten Entsorgungsoptionen (siehe Abschnitt 3.2.1) entwickelt. Im wichtigsten Ergebnis des AP, der Risikokarte, werden die Optionen einander vergleichend gegenübergestellt.

Die Arbeitspakete zur Langzeitsicherheit von Tiefenlagern, zu Radionuklidquelltermen für verschiedene Entsorgungsoptionen und zur individuellen Dosimetrie für Beschäftigte in Entsorgungsanlagen weisen eine enge Verbindung zu VP 5 und 6 auf. Es wurden Grundlagen entwickelt, um die Ausbreitung von aus Lagerbehältern in einem Tiefenlager austretenden Radionukliden besser zu verstehen. Im AP Individuelle Dosimetrie für Beschäftigte in Entsorgungsanlagen wurden individuelle Dosisbelastungen für Personal in Tiefenlagern ermittelt. Diese Arbeiten wurden schließlich zusätzlich auf die Oberflächenlagerung ausgerichtet. Die Arbeitspakete zum Vergleich der radiologischen Gefährdung für verschiedene Entsorgungsoptionen und zum Einfluss der Radionuklidspeziation auf Transferfaktoren weisen ebenfalls Bezüge zu allen VP auf.

Intensiver Austausch zwischen den Beteiligten im TP 4 fand vor allem im Rahmen von zwei TP-Treffen statt. Interdisziplinäre Zusammenarbeit und Vernetzung führten dazu, dass die Ausrichtung einzelner AP im Ver-

lauf der Forschungsarbeiten neuen Erkenntnissen angepasst wurde. Das 2014 verfasste Memorandum (Röhlig u. a., 2014) und die seit 2015 entwickelten Bewertungsgrundlagen schufen einen Rahmen, der auch die vergleichende Risikobewertung beeinflusste.

Projektfortschritt im Rahmen der Risikotreffen

Über den gesamten Projektverlauf hinweg erwiesen sich Risiko und Sicherheit als wichtige Querschnittsthemen bei ENTRIA . Daher fanden mehrere Treffen dazu statt.

Diese Treffen waren zum einen darauf ausgerichtet, das Verständnis von Risiko und Sicherheit zu klären, das bei ENTRIA Verwendung finden sollte. An einem Risiko-Workshop im Rahmen des Jahrestreffens von ENTRIA 2013 in Goslar wurde der Risikobegriff aus dem Blickwinkel unterschiedlicher Fachdisziplinen vorgestellt. Anschließend fand eine Diskussion zum gemeinsamen weiteren Vorgehen statt. Dabei zeigte sich, dass bei ENTRIA zunächst auf eine Disaggregation der Konzepte von Risiko und Sicherheit hingearbeitet werden sollte. Ergänzend wurden verschiedene Fragen bei einem Treffen im Juli 2014 vertieft, beispielsweise das „technische Risikoverständnis“. Bei verschiedenen Gesprächen im engeren Kreis, an denen anfänglich neben dem Team des AP „Interdisziplinäre Risikoforschung“ vor allem Vertreter der Sozialwissenschaften und der Ethik beteiligt waren, wurde auch auf ein gemeinsames Verständnis zu spezifischeren Fragen hingearbeitet, zum Beispiel zum Verhältnis von Risiko und Freiwilligkeit.

Zum anderen wurde bei ENTRIA bereits 2013 die Bedeutung von Referenzmodellen für eine vergleichende Risikobewertung erkannt. Es zeigte sich, dass die Entsorgungsoptionen bei ENTRIA, die ursprünglich sehr generisch formuliert worden waren, für eine aussagekräftige vergleichende Risikobewertung konkretisiert werden mussten. Dabei galt es, eine sinnvolle „mittlere Ebene“ zwischen rein generischen Modellen auf der einen Seite und detaillierten, womöglich standortspezifischen Modellen auf der anderen Seite zu finden, die einen aussagekräftigen Vergleich der Entsorgungsoptionen erlaubt. An den Treffen, an denen ein gemeinsames Verständnis der Referenzmodelle angestrebt wurde, waren vor allem Vertreter der Vertikalprojekte und des AP „Interdisziplinäre Risikoforschung“ beteiligt. Ergänzend wurden immer wieder auch Gespräche im kleineren Kreis geführt, an denen neben Vertretern des AP „Interdisziplinäre Risikoforschung“ unter anderem Vertreter des IFAD und des IELF beteiligt waren.

Innerhalb des Transversalprojekts „Interdisziplinäre Risikoforschung“ bei ENTRIA fanden 2014 und 2016 Transversalprojekt-Treffen statt, an denen alle APs innerhalb des Transversalprojekts teilnahmen. Schwerpunktthema des Treffens im Jahr 2014 war die Vernetzung innerhalb des Transversalprojekts und bei ENTRIA. Das Treffen im Jahr 2017 war dem Schwerpunktthema „Szenarien“ gewidmet. An beiden Treffen fand auch ein Austausch mit externen Referenten zu risikorelevanten Themen wie „Sicherheitskultur“ oder „Markierung von Tiefenlagern“ statt. Weitere Ausführungen dazu finden sich in Abschnitt 5.4.1. Die Risikotreffen bei ENTRIA haben wesentlich zur Vernetzung der AP und zur Klärung gemeinsamer Fragestellungen beigetragen.

3.1.4 Methodenreflexion

Werkstattgespräche

Das IRW initiierte drei Werkstattgespräche an der TU Braunschweig. Inhaltliche Gegenstände waren „Grenzwertbildung im Strahlenschutz“ (Kooperation IRS Hannover und IRW Braunschweig), „Umwelt, Gerechtigkeit, Freiwilligkeit“ (Kooperation PhilSem Kiel und IRW Braunschweig) sowie „Emotionen bei der Realisierung eines Endlagers“ (IRW Braunschweig).

Die Grundidee war, im Rahmen einer Veranstaltung durch jeweils vier Vorträge aus unterschiedlichen Disziplinen schnell und konzentriert in ein Thema einzuführen und vertiefende Diskussionsmöglichkeiten anzubieten.

Die Veranstaltungen wendeten sich an Mitarbeiter von ENTRIA, an Studierende sowie interessierte Bürgerinnen und Bürger. Sie waren als besonderes Angebot für Studierende eingebettet in die Vorlesung Technikrecht. Nicht zuletzt aufgrund von Belastungen der Region Braunschweig mit drei Endlagerstandorten und einem Nukleardienstleistungsunternehmen fanden sich auch engagierte und kundige Bürger ein. Zusätzlich zu den Vorträgen von namhaften Wissenschaftlern und dem akademischen Austausch konnten so in den niederschweligen Diskussionsrunden die Konflikte zwischen Experten und Bürgern erlebt werden. Auftreten und vorgebrachte Argumente deckten eine Bandbreite von polemischen über emotionale und kritische bis hin zu neutral-sachlichen Reaktionen ab. Paradigmatisch zeigte sich beim Thema Emotionen und historische Aufarbeitung der Konflikte um die friedliche Nutzung der Kernenergie, wie der übereilte technokratische Wunsch nach Verwertung von Inhalten schnell Ablehnung und den Vorwurf der Legitimationsforschung provozierte.

Ergebnisse wurden über Tagungsberichte und Tagungsbände – für die weitere Autoren gewonnen wurden, um das disziplinäre Spektrum zu erweitern – festgehalten und weiterverbreitet (Smeddinck u. König, 2016; Smeddinck, 2018; Ott u. Smeddinck, 2018).

Methodische Beiträge zur vergleichenden Risikobewertung

Die vergleichende Risikobewertung bei ENTRIA stand zu Beginn vor drei großen methodischen Herausforderungen: Erstens musste geklärt werden, welches Verständnis von Risiko der Bewertung zugrunde gelegt werden sollte. Zweitens mussten die Entsorgungsoptionen soweit konkretisiert werden, dass ein sinnvoller Vergleich der Risiken möglich war. Und drittens musste ein Verfahren entwickelt werden, das in einen aussagekräftigen Risikovergleich mündet.

Zum Verständnis von Risiko wurde zunächst Fachliteratur aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen konsultiert. Dazu zählten sowohl Publikationen, die sich mit Risiko und Sicherheit aus der Perspektive verschiedener Fachdisziplinen befassen, als auch solche, die der Risikowahrnehmung und der Meinungsbildung zu Risiken von Individuen und innerhalb gesellschaftlicher Gruppen gewidmet sind. Darauf aufbauend wurden die verschiedenen Faktoren betrachtet, die in Risikoverständnis eingehen. Dieses Vorgehen erwies sich vor allem im Hinblick auf die individuelle Risikowahrnehmung und Meinungsbildung zu Risiken als interessant. Hier wurde eine vertiefte sozialwissenschaftliche Analyse der Fachliteratur vorgenommen, die im ENTRIA-Arbeitsbericht 05 zum Thema Risikoansichten (Marti, 2016) dokumentiert und von Eckhardt u. Rippe (2016) untermauert wurde.

Die Analyse wissenschaftlicher, technischer und gesellschaftlicher Diskurse zur Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe verwies darauf, dass Ungewissheiten eine zentrale Rolle zukommt – vor allem aufgrund der nach gesellschaftlichen Maßstäben langen Zeiträume, über die eine sichere Entsorgung gewährleistet werden soll. Aus ethischen Überlegungen heraus wurde daher der Vorschlag entwickelt, eine vergleichende Risikobewertung anhand von kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten vorzunehmen. Dieser Bewertung liegt folgendes Verständnis von Risiko zugrunde: Von Risiko wird gesprochen, wenn ein Schaden mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten oder nicht eintreten kann. Ungewissheit bezeichnet einen Mangel an Information, der eine Risikoeinschätzung erschwert oder verunmöglicht. Bei der Bewertung von Risiken und Ungewissheiten bei ENTRIA wurden zudem psychosoziale Aspekte stark gewichtet, um die vergleichende Risikobewertung über ein technisch-natur-

wissenschaftliches Risikoverständnis hinausgehend für Aspekte der gesellschaftlichen Risikowahrnehmung zu öffnen.

Die Konkretisierung der Entsorgungsoptionen durch Referenzmodelle wird im Kapitel „Naturwissenschaftlich-technische Grundannahmen“ näher beschrieben. Eine erste Grundlage dafür wurde bei ENTRIA mit dem Arbeitsbericht 01 zur Darstellung von Entsorgungsoptionen (Appel u. a., 2015) entwickelt.

Die mit einer Entsorgungsoption verbundenen Risiken und Ungewissheiten verändern sich im Verlauf der Zeit. Beim Verfahren zum Risikovergleich wurde daher entschieden, die vergleichende Risikobewertung anhand von zeitlich gestaffelten Entwicklungsschritten der Referenzoptionen vorzunehmen. Die Ergebnisse der Bewertung werden in der im Rahmen von ENTRIA entwickelten „Risikokarte“ entlang eines Zeitstrahls dargestellt. Die Entwicklung der drei Referenzoptionen wurde dabei in charakteristische Phasen unterteilt, die bei allen Entsorgungsoptionen ungefähr synchron verlaufen. Bei der Beschreibung dieser Phasen wird davon ausgegangen, dass die Entwicklung der Entsorgungsoption weitgehend so erfolgt, wie sie heute geplant ist. Es werden aber auch alternative Entwicklungspfade erwogen, insbesondere die Rückholung oder Bergung der Abfälle.

Die vergleichende Risikobewertung erfolgte zum einen anhand von Ungewissheiten und kalkulierbaren Risiken. In die Betrachtung wurden dabei nicht nur Aktivitäten einbezogen, die im direkten Zusammenhang mit dem jeweiligen Referenzmodell stehen, sondern auch wichtige sicherheitsrelevante Aktivitäten, die die zeitliche Entwicklung des Referenzmodells begleiten. Dabei sind insbesondere Zwischenlagerung und Transporte von hoch radioaktiven Abfällen von Bedeutung. Der Bewertung liegt ein breites Spektrum an potentiellen Risiken zugrunde, beispielsweise radiologische Risiken, Risiken aufgrund von Arbeitsunfällen oder psychosoziale Risiken im Zusammenhang mit konfliktbeladenen Situationen.

Neben der Bewertung nach Risiken und Ungewissheiten wurden die kalkulierbaren radiologischen Risiken im Normalbetrieb und aufgrund von Störfällen eingehender untersucht, da diese Risiken im gesellschaftlichen Diskurs eine wichtige Rolle spielen.

Zum anderen wurde eine Bewertung nach Robustheitsdefiziten vorgenommen, der die Untersuchung von Sicherheitsfunktionen und Robustheit der Entsorgungsoptionen zugrunde liegt. Unter Sicherheitsfunktionen versteht man Eigenschaften oder in Entsorgungsoptionen ablaufende Prozesse, die in einem sicherheitsbezogenen System oder einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleisten. Robustheit ist die Unempfindlichkeit einer Sicherheitsfunk-

tion gegenüber inneren und äußeren Einflüssen sowie ihre Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit im Sinne des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen. Mit Hilfe der Analyse von Sicherheitsfunktionen und Robustheit können risikobezogene Stärken und Schwächen von Entsorgungsoptionen ermittelt werden.

Robustheitsdefizite wurden im Zusammenhang mit Risiken näher untersucht, die sich mit schweren Einwirkungen von außen auf die Entsorgungsanlage verbinden. Außerdem wurde eine vergleichende Bewertung der Tiefenlageroptionen nach Robustheitsdefiziten vorgenommen, die sich auf die Langzeitsicherheit der Entsorgungsanlagen bezieht.

Die verschiedenen Bewertungsverfahren beleuchten die Risiken der bei ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen aus unterschiedlichen Perspektiven. Sie ergänzen sich zudem, indem die Bewertung nach Robustheitsdefiziten der Tiefenlager vor allem auf sehr lange Zeiträume ausgerichtet ist, während die anderen Bewertungen primär für den Zeitraum zwischen 0 und 200 Jahren nach dem Beschreiten eines neuen Entsorgungspfadcs aussagekräftig sind.

Da die Referenzmodelle bei ENTRIA generisch angelegt sind, erfolgte die vergleichende Bewertung nicht quantitativ, sondern wurde durchgehend verbal-argumentativ mit einem strukturierten Vorgehen vorgenommen. Dabei kam ein Outranking-Verfahren zur Anwendung. Eine Entsorgungsoption wird im Vergleich zu den anderen untersuchten Optionen günstig bewertet, wenn die mit ihr verbundenen kalkulierbaren Risiken, Ungewissheiten und Robustheitsdefizite gering sind. Die Grundlagen und Ergebnisse der Bewertungen sind in vier ENTRIA-Arbeitsberichten dargestellt.

Bürgerforum „Wohin mit unserem Atommüll?“

Die Planung für die Durchführung des Forums im Frühjahr 2015 begann im Frühjahr 2014. Neben der strukturellen Organisation – Wahl des Tagungsortes, Auswahl der Teilnehmer, Form und Partner der Moderation – floss die meiste Arbeit in die inhaltliche Konzeption. Normativ betrachtet folgt das Format des Bürgerforums dem diskursiven Ideal einer „idealen Sprechsituation“, in welcher alle Gründe aller Diskursteilnehmer zunächst gleichwertig angehört werden und in der Diskussion nur der zwanglose Zwang des besseren Arguments vorherrscht. Die Besetzung mit Laien und der bewusste Ausschluss von Stakeholdern im Teilnehmerkreis wiederum gründen auf der Annahme, dass der Gemeinsinn einen regulativen Charakter bei der Bildung von allgemeinen Urteilen hat. Der

Teilnehmerkreis ist durch die geringe Anzahl und das Zufallsprinzip nicht repräsentativ.

Auf politischer Seite folgte dem Bürgerforum eine Einladung von Teilnehmern zur Auftaktveranstaltung zur Bürgerbeteiligung der Kommission in Berlin am 20. Juni 2015 und eine Vorstellung des Gutachtens in einer Sitzung der AG 1 der Kommission (Allenfort u. a., 2015). Den Teilnehmern wurde so die Möglichkeit gegeben, sich direkt an einer gesellschaftspolitischen Debatte zu beteiligen.

Delphi-Studie

Anhand einer Delphi-Studie sollten möglichst diverse Ansichten über verschiedene Problematiken der Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe abgebildet und der gesamtgesellschaftliche Dissens näher analysiert werden. Insofern ist die Delphi-Studie im Sinne eines Politik-Delphis zu verstehen (Turoff, 2002) und entspricht weniger dem „klassischen Ansatz“ (Häder, 2014).

Die Studie bestand aus zwei Befragungsrunden, wobei in der ersten Runde anhand eines möglichst heterogenen Meinungsbildes und unterschiedlicher Argumentationen der Möglichkeitsraum qualifizierter Aussagen identifiziert wurde, um der Komplexität des Diskurses Rechnung zu tragen. Hierbei lag der Fokus nicht, wie beim Bürgerforum, auf Einigung und Verabschiedung der Argumente im Konsens, sondern auf der bewussten Identifikation von Dissensen, um Widersprüche für die zweite Frageunde herauszuarbeiten und anzuwenden. Es wurden 25 Aussagen und Fragen für die zweite Umfrage formuliert, mit der Intention, dass sich die Teilnehmenden zu konkreten Standpunkten und Argumenten verhalten mussten, statt bloß ihre Meinung wiederzugeben¹. Bei der Beantwortung der Fragen herrscht so ein gewisser Begründungszwang, um den Angaben gewisse Überzeugungskraft und Gültigkeit zu verleihen.

Im Gegensatz zur exklusiven Expertenkultur der früheren Technikfolgenabschätzung bezieht sich „Experte/Expertin“ im partizipativen Ansatz des AP nicht (nur) auf die Legitimation durch berufliche Tätigkeit, sondern vielmehr auf den möglichst großen Erfahrungshorizont zur Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe. Daher sind explizite Adressaten der Studie unter anderem Personen aus Umweltverbänden und Bürgerinitiativen. Zur Identifikation möglicher Experten und Expertinnen wurden in Anlehnung an das Akteurs-Screening (Häfner, 2016) verschiedene politische Akteure und Akteursgruppen identifiziert. Insgesamt 11 Personen aus den folgenden Kategorien nahmen an der ersten Runde teil: i) Bundes-

¹Im Sinne eines „extended peer review“, vgl. Funtowicz u. Ravetz (1993).

und Landesbehörde (n = 3), ii) Wissenschaft (n = 4), iii) Unternehmen (n = 2), iv) Umweltverband/NGO/Bürgerinitiative (n = 1) sowie vi) Sonstige (n = 1). Der Fragebogen umfasste 20 Fragen, welche ganz unterschiedliche Problematiken der Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe thematisierten (z. B. Fragen zu Sicherheit, Gerechtigkeit, Entsorgungsoptionen).

Das Expertenpanel der zweiten Befragungsrunde umfasste 10 Personen: 9 der Teilnehmenden der ersten Runde, und eine weitere Person aus einer NGO, die an der ersten Fragerunde nicht beteiligt war. In dieser Runde sollten die Teilnehmenden zentrale Aussagen aus der ersten Runde reflektieren und sich zu ihnen argumentativ verhalten. Ziel der Studie war ein besseres Verständnis der Dissenslage unter den Befragten (z. B. mögliche Gründe und Bedingungen). Ihre detaillierte Auswertung wird in einer Veröffentlichung vorgenommen, die Ende 2018 erscheinen wird.

Wissenschaftstheoretische Auseinandersetzung mit inter- und transdisziplinärer Forschung: Entstehung des Sammelbandes „Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe“

Muss man nicht auch die Möglichkeit eines einheitlichen Begriffsverständnisses zwischen den beteiligten Disziplinen diskutieren? Diese auf dem Auftakttreffen in Goslar im April 2013 aufgeworfene Frage eines Ministerialbeamten gab den Anstoß, die Arbeit im ENTRIA-Projekt auch wissenschaftstheoretisch zu flankieren. Ergebnis war unter anderem der Sammelband „Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe“.

Der spätere Herausgeberkreis erarbeitete zunächst einen Text, der die Notwendigkeit zu inter- und transdisziplinärer Entsorgungsforschung darlegt, deren Möglichkeiten diskutiert und Herausforderungen aufzeigt (Chaudry u. a., 2016). Die Idee, ein solches Buchprojekt zum Vehikel für die Auseinandersetzung mit und über Interdisziplinarität in ENTRIA zu machen, war bereits beim Auftakttreffen in Goslar aufgekommen.

Im ersten Teil des Sammelbandes reflektieren die Autoren und Autorenteam Grundlagen, Methoden und Grenzen des eigenen Faches sowie dessen Bezug zur Thematik der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Leitgedanke war die Ermöglichung eines niederschweligen Einstiegs für disziplinfremde Wissenschaftler und die Schaffung einer gemeinsamen Wissensbasis für Beteiligte und Leser. In der alltäglichen Projektarbeit gibt es häufig wenig Möglichkeiten zur Reflexion über die Grenzen der eigenen Disziplin. Diese sind insbesondere jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern häufig wenig bewusst, da sie im Studium kaum thema-

tisiert werden; dieses Wissen ist jedoch eine wesentliche Voraussetzung für erfolgreiche disziplinenübergreifende Zusammenarbeit.

Erste Erfahrungen mit der Zusammenarbeit im ENTRIA-Projekt, geplante interdisziplinäre Arbeiten und die Betrachtung gemeinsamer Fragen von verschiedenen disziplinären Standpunkten aus stehen im Fokus des zweiten Teils. U. a. wird die Eingangsfrage nach einem einheitlichen Begriffsverständnis aufgegriffen und im Beitrag „Möglichkeiten und Grenzen der Vereinheitlichung wissenschaftlicher Begriffe in der interdisziplinären Zusammenarbeit – eine politik- und rechtswissenschaftliche Auseinandersetzung“ reflektiert.

Wissenschaftstheoretisch setzen sich die letzten beiden Beiträge des Sammelbandes mit der Frage nach inter- und transdisziplinärer Entsorgungsforschung auseinander. Der Beitrag „Wissenschaftliche Synthese bei der Forschung zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe in der Forschungsplattform ENTRIA“ widmet sich vor allem der Differenzierung der verschiedenen Spielarten disziplinenübergreifender Forschung und legt einen Schwerpunkt auf die geplante Wissenssynthese im Forschungsverbund ENTRIA. Armin Grunwald schließlich geht in seinem Beitrag darüber hinaus und befasst sich mit der Notwendigkeit von Wissensintegration zur Lösung der Entsorgungsfrage.

In methodischer Hinsicht betraten die meisten Autoren mit ihren Texten und der Mitarbeit an dem Sammelband Neuland. Nicht nur die Inhalte, sondern auch die Prozesse zur Entwicklung und Gestaltung des Bandes waren in hohem Maße interdisziplinär kooperativ angelegt. Während im ersten Teil noch vermehrt einzelne Autoren oder Teams verwandter Disziplinen für die Texte verantwortlich zeichnen, wurden die Beiträge des zweiten Teils ausschließlich von interdisziplinären Teams aus zwei oder drei Autoren erarbeitet. Interdisziplinär bedeutet in diesem Fall fast immer, dass die Autoren Wissenschaftsdisziplinen angehören, die originär nicht über gemeinsame Grundlagen oder eine in Teilen gemeinsame Sprache verfügen. So wurde bereits das Schreiben der Textentwürfe zu einem interdisziplinären Lernprozess für die Beteiligten.

Die Textentwürfe wurden in zwei Autorenworkshops im März und Juni 2015 besprochen. Im Vorfeld wurden die Entwürfe verteilt und gelesen. Jeder Text wurde von einem der nicht daran beteiligten Autoren vorgestellt und einer gründlichen Kritik unterzogen. Anschließend wurde der Beitrag im Plenum diskutiert. Als besonders positiv wurde die gleichzeitig schonungslose und konstruktive Analyse durch den Referenten und die Kollegen bewertet.

Viele der überarbeiteten Manuskripte wurden in einem zweiten Workshop ein weiteres Mal kritisch gesichtet. Die Vorstellung und Diskussion

der Entwürfe im Autorenkreis führte dazu, dass die Autoren über ihren eigenen Beitrag hinaus das Gesamtkonzept des Sammelbandes verstehen und mitgestalten konnten. Nicht nur der Sammelband, sondern das gesamte Forschungsprojekt profitierten von dieser Vorgehensweise. Die Anwesenden erwarben viel tiefere Einblicke in die Arbeitsweise der fremden Disziplinen als es im Rahmen von Vorträgen auf Projekttreffen etc. möglich ist. Sie dienten in ihren jeweiligen Teams anschließend als Multiplikatoren. Die Zusammenarbeit bei der Produktion des Sammelbandes gearbei weitere Kooperationen im Verlauf des Projekts. Über die Bearbeitung und Vermittlung von Inhalten hinausgehend ermöglichen die wechselseitigen Begegnungen erst belastbare und produktive Arbeitsbeziehungen, die von Vertrauen geprägt sind (Frevert, 2013).

Die Auseinandersetzung mit den Begriffen Interdisziplinarität und Transdisziplinarität wirkte in das Projekt hinein und trug dazu bei, dass der Stand der wissenschaftstheoretischen Diskussion über Inter- und Transdisziplinarität in ENTRIA wahrgenommen und aufgegriffen wurde. Viele der Autoren engagierten sich im weiteren Projektverlauf in hohem Maße für die Kooperation und Kommunikation im Projekt, besonders auf der Ebene der Projektmitarbeiter. Nicht zuletzt diente der Sammelband aber dazu, Auseinandersetzung, Erfahrungen und weiterführende Überlegungen aus der ENTRIA-Forschung einem breiteren Publikum zugänglich zu machen (Smeddinck u. a., 2016).

Plädoyer und Gegenrede

Am 5. November 2015 wurde im Rahmen des jährlichen ENTRIA-Projekttreffens von den drei Vertikalprojektleitern je ein Plädoyer für jede der drei betrachteten Entsorgungsoptionen gehalten. Auf jedes Plädoyer antwortete ein Projektmitarbeiter mit einer Gegenrede. Auf dem Weg zur Entwicklung von Bewertungsgrundlagen für die drei von ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen erschien es sinnvoll, zu prüfen, aus welchen Gründen sich für eine Option argumentieren lässt und sich, sei es auch hypothetisch, in Anwaltschaft für sie zu setzen, um sie in einem Plädoyer jeweils mit starken Argumenten möglichst überzeugend zu vertreten. Die Fürsprache soll folgendes leisten: sie hebt deskriptiv die Charakteristika einer Schlüsseloption hervor, die als deren Stärken gelten sollen, unterstreicht diese Stärken argumentativ und versucht, diese Bewertung vor einem gebildeten und kritisch eingestellten Fachpublikum zu verteidigen. Sie weist ipso facto darauf hin, dass aus den Unterschieden der Optionen die Notwendigkeit der Setzung von Prioritäten erwächst, die auf Werturteilen und Kriterien beruhen müssen. Werturteile und Kriterien können

unter höherstufigen Prinzipien (Sicherheit, Gerechtigkeit) beurteilt werden.

Die Gegenrede hat die Rolle des hypothetischen Gegenstandpunktes, das heißt, die Rednerinnen und Redner versuchen, eine Entsorgungsoption so schwach wie möglich darzustellen und ihre Defizite in den Vordergrund zu stellen. Ihr Ziel ist es, eine Option auf ihre Nachteile engzuführen und nur Gründe aufzuzeigen, die gegen die jeweilige Option sprechen, um die Argumente des Plädoyers zu entkräften.

Schließlich ist die Aussprache für eine Option Teil einer deliberativen Entscheidungsfindung. Die Aufgabe der hypothetischen Fürsprache und des hypothetischen Gegenstandpunktes zwingt den Redner, sich in eine fremde Rolle hineinzusetzen. Das wiederum kann zu Rückkopplungen auf die eigene reale Position in der Debatte um den richtigen Entsorgungsweg führen. Die eigene Perspektive wird geweitet und die Fähigkeit zur schlüssigen Argumentation gestärkt.

Literatur

- [Allenfort u. a. 2015] Allenfort, Heike; Anders, Ortwin; Bader-Giese, Sylvia; Bernt, Oliver; Klos, Inge; Kussicke, Horst; Larisch, Heidi; Liebing, Claudia S.; Lieshoff, Thomas; Narberhaus-Höhner, Mechthild; Pommerenke, Kurt; Prescher, Andreas; Schwaab, Friedrich; Strauß, Ingrid; Tilmans, Anja; Wentzel, Gert; Westen, Timo; Wieder, Andreas: *Bürgergutachten „Wohin mit unserem Atommüll?“*. http://www.bundestag.de/blob/365600/a762d9d615164690cb2957db510cb605/kmat_20-data.pdf
- [Alt u. a. 2017] Alt, Stefan; Kallenbach-Herbert, Beate; Neles, Julia: Gutachterliche Stellungnahme zu wichtigen sicherheitstechnischen Aspekten der Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle / Öko-Institut. Darmstadt, Dezember 2017 – Forschungsbericht
- [Appel u. a. 2015] Appel, Detlef; Kreusch, Jürgen; Neumann, Wolfgang: Darstellung von Entsorgungsoptionen. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2015 (1) – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Budelmann u. a. 2017] Budelmann, Harald; Di Nucci, Maria R.; Isidoro Losada, Ana M.; Köhnke, Dennis; Reichardt, Manuel: Auf dem Weg in die Endlagerung. Die Notwendigkeit der langfristigen Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2017), Nr. 2, S. 110–113

- [Chaudry u. a. 2016] Chaudry, Saleem; Kuppler, Sophie; Smeddinck, Ulrich: Inter- und Transdisziplinarität als Voraussetzung bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. In: *atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie* 61 (2016), Nr. 3, S. 198–202
- [StandAG 2013] Deutscher Bundestag: *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz - StandAG)*. Juli 2013 – Standortauswahlgesetz vom 23. Juli 2013 (BGBl. I S. 2553).
- [StandAG 2017] Deutscher Bundestag: *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG)*. Juli 2017 – Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- [Eckhardt u. Rippe 2016] Eckhardt, Anne; Rippe, Klaus P.: *Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Zürich: vdf Hochschulverlag, 2016
- [ESK 2015] Entsorgungskommission: Zur verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle. (2015)
- [Frevert 2013] Frevert, Ute: *Vertrauensfragen: eine Obsession der Moderne*. München: Beck, 2013 (Beck'sche Reihe 6104)
- [Funtowicz u. Ravetz 1993] Funtowicz, Silvio O.; Ravetz, Jerome R.: Science for the post-normal age. In: *Futures* 25 (1993), Nr. 7, S. 739–755
- [Häder 2014] Häder, Michael: *Delphi-Befragungen: Ein Arbeitsbuch*. 3. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2014
- [Häfner 2016] Häfner, Daniel: Screening der Akteure im Bereich der Endlagerstandortsuche für radioaktive Reststoffe in der Bundesrepublik Deutschland. Das „Who is who“ eines sich verändernden Konfliktfeldes. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Berlin, 2016 (4) – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Köhnke 2017] Köhnke, Dennis: Die unbestimmte Nutzungsdauer als besondere technische Herausforderung bei der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle. In: (Köhnke u. a., 2017b), S. 71–88

- [Köhnke u. a. 2017a] Köhnke, Dennis; Reichardt, Manuel; Budelmann, Harald: Wie organisieren andere Länder eine langfristige Zwischenlagerung hoch radioaktiver Reststoffe? In: *Atommüll-Lager: Was soll wann wie wohin - und wer macht was?* Bd. 27. Rehburg-Loccum: Harfe-Verlag und Druckerei GmbH, 2017, S. 101–110
- [Köhnke u. a. 2017b] Köhnke, Dennis (Hrsg.); Reichardt, Manuel (Hrsg.); Semper, Franziska (Hrsg.): *Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle: Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen*. Wiesbaden: Springer, 2017
- [Marti 2016] Marti, Michèle: Risikoansichten. Wie Merkmale der Person, der Quelle und des Rahmens die Art und Weise beeinflussen, wie Personen die mit der Entsorgung von radioaktiven Abfällen verbundenen Risiken wahrnehmen und bewerten. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2016 (5) – ENTRIA Arbeitsbericht
- [NRC 2014] Nuclear Regulatory Commission: Generic Environmental Impact Statement for Continued Storage of Spent Nuclear Fuel. 2014 (NUREG-2157) – Final Report
- [Ott 2014] Ott, Konrad: Handeln auf Probe für die Ewigkeit? Die Einlagerung hochradioaktiver atomarer Reststoffe als eine Generationenaufgabe. In: Karafyllis, Nicole C. (Hrsg.): *Das Leben führen? Lebensführung zwischen Technikphilosophie und Lebensphilosophie. Für Günther Ropohl zum 75. Geburtstag*. Berlin: edition sigma, 2014, S. 240–259
- [Ott u. Budelmann 2017] Ott, Konrad; Budelmann, Harald: Oder vielleicht doch nicht unter die Erde - Überlegungen zur Rolle der Oberflächenlagerung in einer Entsorgungsstrategie. In: (Köhnke u. a., 2017b), S. 11–27
- [Ott u. Smeddinck 2018] Ott, Konrad (Hrsg.); Smeddinck, Ulrich (Hrsg.): *Umwelt, Gerechtigkeit, Freiwilligkeit – insbesondere bei der Realisierung eines Endlagers*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2018
- [Riemann 2017] Riemann, Moritz: Gerechtigkeit an der Oberfläche. In: (Köhnke u. a., 2017b), S. 159–171
- [Riemann u. Chaudry 2018] Riemann, Moritz; Chaudry, Saleem: Plädoyers und Gegenreden. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2018 – ENTRIA Arbeitsbericht – Mit weiteren Beiträgen von K.-J. Röhlig, J. Stahlmann, H. Budelmann, S. Kuppler. In Vorbereitung.

- [Riemann u. Köhnke 2016] Riemann, Moritz; Köhnke, Dennis: Interdisziplinarität als Induktion – Von Ingenieuren und Philosophen. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>. In: (Smeddinck u. a., 2016), 105–110
- [Röhlig u. a. 2014] Röhlig, Klaus-Jürgen; Walther, Clemens; Bach, Friedrich-Wilhelm; Brunnengräber, Achim; Budelmann, Harald; Chaudry, Saleem; Eckhardt, Anne; Geckeis, Horst; Grunwald, Armin; Hassel, Thomas; Hocke, Peter; Lux, Karl-Heinz; Mengel, Kurt; Metz, Volker; Ott, Konrad; Plischke, Elmar; Riemann, Moritz; Smeddinck, Ulrich; Schreurs, Miranda A.; Stahlmann, Joachim: Memorandum zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe. https://www.entria.de/fileadmin/entria/Dokumente/ENTRIA_Memorandum_140430.pdf. Hannover, 2014 – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Semper 2017] Semper, Franziska: Aufbewahrungsgenehmigung für radioaktive Abfälle – Verlängerung versus Neugenehmigung. In: (Köhnke u. a., 2017b), S. 141–157
- [Smeddinck 2018] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.): *Emotionen bei der Realisierung eines Endlagers*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2018
- [Smeddinck u. a. 2016] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.); Kuppler, Sophie (Hrsg.); Chaudry, Saleem (Hrsg.): *Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016 <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>
- [Smeddinck u. König 2016] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.); König, Claudia (Hrsg.): *Grenzwertbildung im Strahlenschutz - Physik, Recht, Toxikologie. Grundlagen, Kontraste, Perspektiven*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2016
- [Turoff 2002] Turoff, Murray: The Policy Delphi. <https://web.njit.edu/~turoff/pubs/delphibook/delphibook.pdf>. In: *The Delphi Method. Techniques and Applications*. 2002, 80–96 – Electronic version of the 1975 edition published by Addison-Wesley
- [TÜV 2015] TÜV Nord EnSyS Hannover; Öko-Institut: Gutachten zur Langzeitzwischenlagerung abgebrannter Brennelemente und verglaste Abfälle. 2015 – Forschungsbericht

[Wildi u. a. 2000] Wildi, Walter; Appel, Detlef; Buser, Marcos; Dermange, François; Eckhardt, Anne; Hufschmied, Peter; Keusen, Hans-Rudolf; Aebersold, Michael: Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle. Bern, Januar 2000 – Schlussbericht der Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA) – 95 S.

3.2 Naturwissenschaftlich-technische Grundannahmen zur Analyse der Optionen

3.2.1 Referenzkonzepte und -modelle, Szenarien: Grundlagen

Um einen Beitrag zur Erstellung von Bewertungsgrundlagen, insbesondere für die vergleichende Risikobewertung, leisten zu können, war es notwendig, die Entsorgungsoptionen konfiguratив auszugestalten. Dies geschah exemplarisch mit Hilfe von Referenzkonzepten und -modellen. Ob die Ausgestaltung einer Option auch sicherheitstechnisch vertretbar ist, muss in umfassenden Sicherheitsanalysen untersucht werden: Es stellt sich die Frage, ob bestehende Sicherheitskonzepte übernommen werden können, ob diese modifiziert oder neu entwickelt werden müssen oder ob die konfigurative Ausgestaltung sicherheitstechnisch nicht vertretbar ist und verworfen werden muss. Im Vorhaben ENTRIA wurden aufgrund der Schwerpunktsetzung des Vorhabens keine solchen systematischen Sicherheitsanalysen durchgeführt, es wurden der Vorhabenbeschreibung entsprechend jedoch einige sicherheitstechnische Aspekte (z. B. des Strahlenschutzes und der Bergwerksicherheit in der Betriebsphase und bei einer eventuellen Rückholung sowie der Geomechanik, der Fluidodynamik und des Nuklidtransports nach Verschluss des Tiefenlagers) untersucht. Einzelne Aspekte der Optionen wurden im Vorhaben u. a. anhand von Referenzmodellen und für sie definierter Szenarien auch im Hinblick auf die Bewertungsgrundlagen exemplarisch untersucht, eine umfassende Bewertung der Optionen im Sinne einer Reihung erfolgte jedoch nicht. An der Entwicklung der Referenzkonzepte, -modelle und Szenarien waren alle im Transversalprojekt 4 und in den Vertikalprojekten involvierten Institutionen beteiligt.

Die Referenzkonzepte und -modelle wurden standortunabhängig und bei den Tiefenlagern für die Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Tonstein, Ton und kristallines Hartgestein entwickelt. Sie betreffen insbesondere die technischen Konzepte der Entsorgungsoptionen, einschließlich der Geometrien und der zu verwendenden Materialien der geologischen bzw. (geo-)technischen Barrieren. Die Referenzmodelle zeichnen sich durch ihren „generischen“ Charakter aus, sind aber soweit ausgearbeitet, wie es für eine differenziertere vergleichende Bewertung notwendig ist. Im Abstimmungsprozess zu den Referenzmodellen, an dem alle Vertikalprojekte sowie das Transversalprojekt 4 beteiligt waren, wurden unter anderem folgende grundsätzlichen Übereinkünfte festgelegt:

- Für jede der drei Entsorgungsoptionen können nur je eine oder sehr wenige Varianten rechnerisch betrachtet werden.

- Bei allen Referenzmodellen wird davon ausgegangen, dass sie die heute geltenden Genehmigungsanforderungen im Prinzip erfüllen.
- Die Referenzmodelle werden eindeutig, aber gleichzeitig so flexibel wie nötig definiert. Verbleibende Freiheitsgrade werden benannt und mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben.
- Der Optionenvergleich setzt die Referenzmodelle in Relation zueinander. Es wird keine absolute Bewertung vorgenommen.
- Die Oberflächenlagerung soll für einen Zeitraum von bis zu ca. 200 Jahren konzipiert werden (Genaueres im Abschnitt zur Oberflächenlagerung, s. unten). Welcher Weg danach zur weiteren Entsorgung der Reststoffe eingeschlagen wird, bleibt offen.
- Für die Option „Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit“ (Vertikalprojekt 6) werden Tiefenlager und Einlagerung so gestaltet, dass die Reststoffe auf der Grundlage vorab zu planender Prozesse zurückgeholt werden können.

Die in ENTRIA entwickelten Referenzmodelle waren zusammen mit den Festlegungen für Behälter (Arbeitspaket „Beurteilung von Langzeitstabilität“, AP 6.5) Grundlage

- der Abschätzung von Dosisbelastungen für das Personal bei Einlagerungs- und Rückholvorgängen (Arbeitspakete 4.2 „Vergleich der radiologischen Gefährdung“ und 4.5 „Individuelle Dosimetrie für Beschäftigte in Entsorgungsanlagen“),
- der Untersuchungen zur Funktionstüchtigkeit von Hohlraumsicherungen (z. B. Ausbau) und Abdichtungen und zu Schlussfolgerungen zur möglichen Dauer des Zeitraums der Überwachung (Arbeitspakete 6.3 „Risikoanalytische Bewertung geotechnischer Schutzsysteme“ und 6.4 „Untersuchung der Interaktion der geotechnischen Erfordernisse des Life-Cycle-Engineerings und der risikoanalytischen Betrachtung von Tiefenlagern mit der Option zur Rückholbarkeit“) und
- der numerischen Modellierungen langzeitsicherheitsrelevanter Prozesse für die Wirtsgesteinstypen Steinsalz und Tonstein (Arbeitspakete 4.4 „Radionuklidquellterme für verschiedene Entsorgungsoptionen“, 5.1 „THM-gekoppelte Nahfeld-Prozesssimulation im Salinargebirge“, 5.2 „THM-gekoppelte Nahfeld-Prozesssimulation im Tonsteingebirge“, 5.3 „Numerische Modellierung von THMC-

Prozessen“, 6.7mod² „Numerische Simulation fluiddynamischer Prozesse“). Die Rechenergebnisse zu langzeitsicherheitsrelevanten Prozessen können zum Verständnis des Systemverhaltens sowie ausgewählter ablaufender physikalischer Prozesse beitragen und eine verbal-argumentative Bewertung stützen. Hierfür sind z. B. Ergebnisse zur Barrierenintegrität, zur Gasbildung und zu Fluid- und Schadstoffströmen von Interesse.

3.2.2 Die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der Referenzmodelle

Die Referenzmodelle

Die in ENTRIA zu betrachtenden Referenzmodelle sind generischer Natur und stehen beispielhaft für mögliche zu realisierende Entsorgungsoptionen:

- Tiefenlagerung ohne explizite Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholung der Abfälle (abgekürzt TE). Es handelt sich um Endlager in tiefen geologischen Formationen entsprechend den BMU-Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010), d. h. schneller Verschluss des Endlagers nach Beendigung der Einlagerung. Eine Rückholbarkeit der Abfälle ist jedoch nicht vorgesehen.
- Tiefenlagerung mit Monitoring und Möglichkeit zur Rückholung der Abfälle (abgekürzt TM). Das Endlagerbergwerk wird für einen festzulegenden Zeitraum nach Abschluss der Einlagerung (100 Jahre?) offen gehalten, gefüllte Einlagerungsfelder werden aber verschlossen. Das Monitoring wird über die gesamte Zeit der Offenhaltung durchgeführt, und die eventuelle Rückholung der Abfälle wird bereits bei ihrer Einlagerung berücksichtigt. Der Zeitpunkt des Verschlusses des Tiefenlagers sowie eine eventuelle Rückholung von Abfällen hängen von Entscheidungsprozessen in der Gesellschaft, u. a. auf Basis der Ergebnisse des Monitorings, ab. Die Bergung von Abfällen muss ebenfalls für 500 Jahre gewährleistet werden.
- Oberflächenlagerung (abgekürzt OL): Lagerung der Abfälle in Behältern in einem Gebäude an der Erdoberfläche für einen bestimmten Zeitraum (ca. 200 Jahre). Im Anschluss an die Oberflächenlagerung sind weitere Maßnahmen erforderlich.

²Das AP 6.7mod ist eine im Vergleich zur Vorhabenbeschreibung in Abstimmung mit dem Projektträger modifizierte Version.

Im Folgenden werden die in Transversalprojekt 4 („Interdisziplinäre Risikoforschung“) von risicare zugrunde gelegten Sicherheitskonzepte für die Referenzmodelle kurz vorgestellt. Sie sind Grundlage für die vergleichende Risikobewertung der ENTRIA-Referenzmodelle.

3.2.3 Das Sicherheitskonzept der Referenzmodelle für die Tiefenlager

Allgemeines

Das Sicherheitskonzept für ein Tiefenlager beschreibt in allgemeiner und qualitativer Weise grundlegende Sicherheitsanforderungen (z. B. Einschlussgedanke, Integritätsgedanke, Wartungsfreiheit, Kritikalitätsausschluss), wobei jede Sicherheitsanforderung mit Einzelanforderungen unterlegt wird, mit deren Hilfe die langfristig sichere Lagerung der radioaktiven Abfälle gewährleistet werden soll. Ein solches Sicherheitskonzept ist in Deutschland zum ersten Mal im Rahmen der „Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben“ (VSG) im Detail für einen Salzstock ausgearbeitet worden. Das Sicherheitskonzept stellt damit die Grundlage für alle weiteren gehenden Arbeiten für Referenzmodelle zu den Optionen TE und TM im Rahmen des Transversalprojekts 4 dar.

Das im Folgenden dargestellte Sicherheitskonzept für TE und TM orientiert sich an dem Sicherheitskonzept der VSG, denn es besitzt alle Elemente, die für die Risikobetrachtungen im Transversalprojekt 4 relevant sind. Mehr noch: Das Sicherheitskonzept eines Salzstockes kann in seinen grundlegenden Prinzipien auch auf die Wirtsgesteine Tonstein und Salz in flacher Lagerung übertragen werden. Sowohl bei Lagerung in Salz als auch in Tonstein gelten die gleichen Grundanforderungen, nämlich der möglichst weitgehende, sofortige und dauerhafte Einschluss der Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich (einschlusswirksamer Gebirgsbereich – ewG)³. Im Rahmen des Vertikalprojekts 6 erfolgten darüber hinaus Untersuchungen zu Tiefenlagern im kristallinen Hartgestein.

Zudem können beide Tiefenlagertypen TE und TM diesem Sicherheitskonzept zugeordnet werden, denn für beide besteht das letztendliche Ziel der Tiefenlagerung im dauerhaft passiven Einschluss der Abfälle in der tiefliegenden geologischen Wirtsgesteinsformationen. Gemessen am gesamten Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahren ist beim Tiefenlagertyp TM die Zeitspanne für Monitoring und Rückholbarkeit vernachlässigbar ge-

³Vgl. eingehend die im Rahmen von ENTRIA entstandene und von IGB und IRW betreute Masterarbeit von Driftmann (2016).

ring. Allerdings bringt das längere Offenhalten bei TM einige spezielle Risiken mit sich.

Kurzdarstellung wesentlicher Komponenten des Sicherheitskonzepts

Das Sicherheitskonzept legt fest, mit welchen Maßnahmen die in (BMU, 2010) vorgegebenen Schutzziele erreicht werden sollen und auf welchen Sicherheitsfunktionen die Sicherheit und der Sicherheitsnachweis für entsprechende Standorte in Steinsalz basieren sollen. Es ist sowohl für die steile und die flache Lagerung in Salz als auch für die Lagerung in Tonstein auf einer generischen Ebene identisch, und zwar für die Referenzmodelle für die Optionen TE und TM. Für diese Referenzmodelle sind folgende Komponenten von Bedeutung für das die Langzeitsicherheit gewährleistende Sicherheitskonzept:

Komponente einschlusswirksamer Gebirgsbereich. Er stellt die langfristig wichtigste Barriere für beide Wirtsgesteine dar. Wegen seiner extrem geringen Permeabilität, seinem ausgeprägt plastischen Verhalten und seiner guten Temperaturverträglichkeit kann Steinsalz – eine gute Standortauswahl vorausgesetzt – langfristig Lösungszuflüsse zu den Abfallgebinden bzw. Freisetzung und Transport von Lösungen mit Radionukliden aus den Abfallgebinden in die Biosphäre verhindern. Aufgrund seiner hydraulischen Eigenschaften (praktische Dichtheit) ist Steinsalz das einzige Wirtsgestein, in dem der vollständige Einschluss der Schadstoffe im ewG für den gesamten Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahre realisiert werden kann.

Tonstein weist eine geringe Permeabilität und eine hohe Sorptionskapazität auf und zeichnet sich durch plastisches Verhalten aus. Die Permeabilität von Tonstein ist jedoch nicht so gering, dass ein Zutritt von Formationswässern an die Abfälle und die nachfolgende Freisetzung von Radionukliden ausgeschlossen werden kann. Deshalb soll die Ausbreitung von Radionukliden im Tonstein in einem Endlager diffusionsdominiert sein; ihre advective (strömungsgetragene) Ausbreitung ist zu vermeiden. Wegen der Diffusion ist ein vollständiger Einschluss der Radionuklide im Tonstein innerhalb des ewG für den Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahre unter realen Bedingungen nicht erreichbar. Ein sicherer Einschluss im ewG, der das Übertreten vernachlässigbare Schadstoffmengen vom ewG in das umgebende Wirtsgestein gestattet, ist bei guter Standortauswahl für den geforderten Nachweiszeitraum jedoch möglich. Im Gegensatz zum Sicherheitskonzept für Salzformationen, bei dem der Einschluss der Radionuklide im ewG dadurch erreicht werden soll, dass

ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen be- bzw. verhindert wird, erfolgt der Einschluss der Radionuklide im ewG des Tonsteins also primär durch die Behinderung des diffusionsdominierten Schadstofftransports und durch chemische und physikalische Prozesse der Rückhaltung von Radionukliden innerhalb des ewG.

Komponente Versatz. Die notwendige Durchörterung des Wirtsgesteins bzw. des ewG durch das Auffahren verschiedenster Gruben Hohlräume führt zu einer unvermeidlichen Schwächung der Barriere Wirtsgestein. Sie muss kompensiert werden durch wirksame technische Verschlüsse aus arteigenem Material. Dazu dient bei Steinsalz der zum Versatz der Resthohlräume des Tiefenlagerbergwerks benutzte Salzgrus, der wegen seiner Kompaktion infolge der Gebirgskonvergenz im Verlaufe der Zeit seine Permeabilität und Porosität soweit verringern soll, dass er sich der Qualität des ungestörten Wirtsgesteins annähert. Der Zeitraum, bis die angestrebte Qualität erreicht wird, erstreckt sich nach derzeitigem Kenntnisstand in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen (z. B. Temperatur, Feuchtegrad des Salzgruses) von einigen hundert Jahren bis zu wenigen tausend Jahren. Bei Tonstein sind die notwendigen Perforationen des Wirtsgesteins, speziell des ewG, ebenfalls durch den Versatz zu verschließen. Dazu bieten sich Bentonit oder ein Bentonit-Sand-Gemisch an, da sie wirtsgesteinsähnliche Eigenschaften aufweisen. Der Versatz erreicht die geforderten einschlusswirksamen Eigenschaften erst nach seiner homogenen Aufsättigung und Quellung. Die dazu benötigte Zeitdauer liegt nach heutigem Kenntnisstand bei einigen tausend Jahren.

Insgesamt sind die beiden Komponenten ewG und Versatz (Salzgrus, Bentonit) im Verbund für die langfristige Isolationswirkung der Abfallprodukte über den gesamten Nachweiszeitraum von einer Mio. Jahre von entscheidender Bedeutung.

Komponenten schnell wirksame Streckenabdichtungen und Schachtabdichtungen. Bis der Versatz seine volle Wirksamkeit erreicht hat, müssen schnell wirksame Strecken- und Schachtabdichtungen dafür sorgen, dass die Abdichtung der Einlagerungsfelder gegen den Zutritt von Formationslösungen und Lösungen von außerhalb gewährleistet wird. Die technischen Abdichtungen können standortspezifisch aus verschiedenen diversitären und redundanten Abdichtelementen aufgebaut sein. Sie müssen in dieser frühen Nachbetriebsphase schnell wirken und einen Zeitraum bis ca. 10.000 Jahren abdecken.

Die Strecken- und Schachtabdichtungen besitzen als geotechnische Bauwerke eine – bezogen auf den gesamten Nachweiszeitraum von 1 Mio.

Jahre – nachgeordnete Bedeutung. Sie sind aber in den ersten Jahrtausenden bedeutsam, bis der ewG im Verbund mit den geotechnischen Barrieren die Langzeitsicherheit gewährleisten kann.

Komponente Abfallbehälter. Dem Abfallbehälter kommt im Salz eine zeitlich deutlich begrenzte Anforderung zu. Er soll mindestens 500 Jahre dicht gegenüber der Freisetzung radioaktiver Aerosole und innerhalb dieses Zeitraumes im Fall einer Bergung handhabbar sein. Darüber hinaus werden an ihn keine weiteren Anforderungen gestellt. Der Abfallbehälter ist also nur während der Betriebsphase und zu Beginn der Nachbetriebsphase für einen Zeitraum bis 500 Jahre – vielleicht auch bis zu 1.000 Jahren – im Salzgestein bedeutsam. In Tonstein sind die Anforderungen an den Abfallbehälter höher als bei Salz. Das hängt vor allem mit der langsameren Entwicklung des Bentonitversatzes (s.o.) zusammen. So wird beispielsweise in der Schweiz von der Dichtheit des Behälters für einen Zeitraum von bis zu 10.000 Jahren ausgegangen.

Insgesamt beruht das skizzierte Sicherheitskonzept für die beiden Tiefenlager TE und TM und die beiden Wirtsgesteine auf wenigen Sicherheitskomponenten, deren funktionale und zeitliche Wirksamkeit jeweils aufeinander abgestimmt sind. Die beiden wichtigsten langzeitwirksamen Komponenten stellen der ewG und der Versatz dar. Der ewG ist dabei funktional unverzichtbar.

Langfristig soll sich das Tiefenlager zu einem passiv-sicheren Zustand hin entwickeln, in dem die radioaktiven Abfälle von menschlichem Handeln und natürlichen Entwicklungen unabhängig sicher lagern sollen.

Das über den ewG hinausgehende Wirtsgestein sowie das Deck- und Nebengebirge der Wirtsgesteinsformationen müssen als Sicherheitsreserven angesehen werden. Sie werden im Vorhaben ENTRIA nicht weiter behandelt, da ihre Eigenschaften sehr von standortspezifischen Aspekten abhängen.

Sicherheitskonzept, Systemkomponenten und abgeleitete Sicherheitsfunktionen

Ausgangspunkt der Ableitung und Zusammenstellung der Sicherheitsfunktionen ist das jeweilige Sicherheitskonzept, das den Referenzmodellen der beiden Tiefenlager TE und TM für die Gesteinsarten Salz- und Tonstein zugrunde liegt. Es besteht aus einzelnen Komponenten (s.o.), die ihrerseits in Sicherheitsfunktionen untergliedert werden können.

Nach der Definition des (BMU, 2010) ist eine Sicherheitsfunktion „...eine Eigenschaft oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die bzw.

der in einem sicherheitsbezogenen System oder Teilsystem oder bei einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleistet. Durch das Zusammenwirken solcher Funktionen wird die Erfüllung aller sicherheitstechnischen Anforderungen sowohl in der Betriebsphase als auch in der Nachverschlussphase des Endlagers gewährleistet“.

Die von Transversalprojekt 4 betrachteten Sicherheitsfunktionen der beiden Referenzmodelle zur Tiefenlagerung dienen der Erfüllung definierter sicherheitsrelevanter Anforderungen in der Nachbetriebsphase. Ihre übergeordnete integrale Aufgabe besteht in der Isolation der Schadstoffe in den Tiefenlagern, speziell innerhalb des ewG. Damit stellt sich ein Bezug der Sicherheitsfunktionen zum Sicherheitskonzept bzw. seinen Komponenten der Referenzmodelle dar. Es ist kein aktives sicherheitsgerichtetes menschliches Handeln in der Nachbetriebsphase, d. h. nach dem Verschluss der Tiefenlager TE und TM nach Betriebsende, erforderlich. Die sicherheitsgerichtete Absicht von Sicherheitsfunktionen zielt also hauptsächlich auf den Einschluss bzw. die Rückhaltung der Radionuklide ab (radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen). Sie begrenzen oder verhindern Lösungsbewegungen oder den Radionuklidtransport und sind für die Robustheitsbewertung wesentlich. Nur diese Sicherheitsfunktionen werden im Transversalprojekt 4 bewertet.

Daneben existieren integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen, die dem Schutz der Integrität der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen oder Barrieren dienen (z. B. Schutz der maßgeblichen Gesteinsbarrieren vor Erosion). Der von der jeweiligen integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktion geleistete Robustheitsbeitrag wirkt sich auf die entsprechende rückhaltende Sicherheitsfunktion aus und wird deshalb bei letzterer berücksichtigt. Eine eigenständige Bewertung der integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktionen findet deshalb in Transversalprojekt 4 nicht statt.

Die radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen lassen sich räumlich dem jeweiligen Referenzmodell, Teilsystemen von diesem oder Komponenten zuordnen, die als natürliche und technische Barrieren den Einschluss der Radionuklide über kürzere oder längere Zeiträume gewährleisten sollen. In Transversalprojekt 4 geschieht eine Zuordnung der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen zu den Komponenten (s. Tab. 3.1). Einzelne charakteristische Parameter für die Sicherheitsfunktionen weisen als rückhaltende Sicherheitsfunktionsparameter eine wesentliche Bedeutung bei der Ermittlung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen auf (z. B. Permeabilität, Diffusivität, Löslichkeitsgrenzen, Sorption).

Eine noch weiter ins Detail gehende Formulierung der Sicherheitsfunktionen ist im Rahmen der bei ENTRIA zu betrachtenden generischen Betrachtungsebene sinnlos, da die Sicherheitsfunktionen mit zunehmenden Detaillierungsgrad notwendigerweise immer stärker nur noch standort- und konzeptspezifisch beschreibbar und bewertbar sind. Mit Hilfe dieser Sicherheitsfunktionen und ausgewählten funktionalen Parametern werden die Robustheiten der einzelnen Sicherheitsfunktionen ermittelt. Anschließend wird die Robustheit einer Sicherheitsfunktion ins Verhältnis gesetzt zu ihrer Relevanz. Daraus ergeben sich gegebenenfalls Robustheitsdefizite einzelner Sicherheitsfunktionen.

Die für die Tiefenlager vorgenommene Bewertung mittels Sicherheitsfunktionen und Robustheitsdefiziten ist in etwas weniger detaillierter Form auch auf bestimmte Aspekte der Oberflächenlagerung angewandt worden.

3.2.4 Das Sicherheitskonzept für die Oberflächenlagerung

Die Oberflächenlagerung (OL) der abgebrannten Brennelemente und HAW-Kokillen ist für eine Dauer von ca. 200 Jahren vorgesehen. Sie erfolgt trocken in Transport- und Lagerbehältern (TLB). Die Behälter stehen in einem auf der Erdoberfläche errichteten Bauwerk. Im Falle unerwarteter Ereignisse müssen Behälter jederzeit abtransportierbar sein (ESK, 2013).

Einer der zentralen sicherheitstechnischen Aspekte des Lagerkonzeptes ist die in Bezug auf mechanische Einwirkungen von außen vollständig redundante Auslegung von Behälter und Gebäude⁴. Der Behälter soll eine vollständige Barriere gegen mechanische und thermische Einwirkungen von außen sein, um radioaktive Freisetzungen zu verhindern oder mindestens stark zu verringern. Das Lagergebäude als redundante Barriere soll so ausgelegt werden, dass es schwerwiegenden mechanischen Einwirkungen von außen widerstehen kann, also standsicher bleibt und nicht perforiert wird. Darüber hinaus soll das Lagergebäude durch seine Konstruktion thermische Belastungen der Behälter durch Einwirkungen von außen oder nach Eindringen brennbarer Flüssigkeiten möglichst gering halten. Die redundante Auslegung entspricht auch der in der Kerntechnik üblichen, sinngemäßen Anwendung der Sicherheitsanforderung an Kernkraftwerke (BMUB, 2015b) auf andere Anlagen mit ähnlichen Radioaktivitätsinventaren.

⁴Reichardt, M. (2016): Widerstand gegen extreme, äußere Einwirkungen. ENTRIA-Fachtagung Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.-02.11.2016.

Tabelle 3.1: Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen (RSF) für Tiefenlager in Salzgestein und Tonstein. Die kursiv gesetzten Komponenten werden nicht betrachtet (Quelle: (Fischer-Appelt u. Baltes, 2010), verändert).

Komponente	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion	Charakteristische RSF-Parameter
Behälter	Begrenzung/Verhinderung Lösungszutritt zum Abfallprodukt wegen Dichtwirkung Behälterwandung Begrenzung der Radionukklidausbreitung durch Löslichkeitsgrenzen Verzögerung der Radionukklidausbreitung durch Sorption am Behältermaterial	Dicke Behälterwandung, Korrosionsbeständigkeit, Druck- u. Zugfestigkeit, Qualitätssicherung, → Standzeit, Ausfallrate pH, Temperatur, Redoxpotential, Lösungszusammensetzung, Komplexierung, Kinetik d. Auflösung, Ausfällung, Radionuklidspezifikation, Lösungsbewegung → Löslichkeitsgrenze Anzahl d. Sorptionsplätze, Elementarzusammensetzung
Versatz	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport Begrenzung der Radionukklidausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen Verzögerte Radionukklidausbreitung durch Sorption	Porosität, Permeabilität, Diffusivität, diffusionsdominierter Transport, Selbstabdichtung durch Quellen oder Konvergenz, diffusionsdominierter Transport pH, Temperatur, Redoxpotential, Lösungszusammensetzung, Komplexierung, Radionuklidspezifikation, Lösungsbewegung Kinetik d. Auflösung, Ausfällung → Löslichkeitsgrenze Mineralzusammensetzung, Korngröße, Porosität, organischer Anteil, Belegung Sorptionsplätze, → Kd-Wert
Abdichtung, Dämme	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport Verzögerung d. Radionukklidausbreitung durch Sorption	Porosität, Permeabilität, Diffusivität, diffusionsdominierter Transport, Selbstabdichtung durch Quellen oder Konvergenz Mineralzusammensetzung, Korngröße, Porosität, organischer Anteil, Belegung Sorptionsplätze, → Kd-Wert
Schachtverschluss	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport Verzögerung d. Radionukklidausbreitung durch Sorption	Porosität, Permeabilität, Diffusivität, diffusionsdominierter Transport, Länge d. Abdichtung, Kontaktbündigkeit Nebengebirge, Selbstabdichtung durch Quellen oder Konvergenz (Bentonit) Mineralzusammensetzung, Korngröße, Porosität, organischer Anteil, Belegung Sorptionsplätze, → Kd-Wert
Einschluss-wirksamer Gebirgsbereich	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport Verzögerung der Radionukklidausbreitung durch Sorption	Porosität, Diffusivität, Permeabilität inkl. 2-Phasen-Parameter, Ausdehnung d. Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der RSF gelten Mineralzusammensetzung, Korngröße, Porosität, organischer Anteil, Belegung Sorptionsplätze, → Kd-Wert
Weiteres Wirtsgestein		
Die konzeptionellen Anforderungen hinsichtlich der Isolationswirkung beschränken sich auf den ewG. Deshalb keine Betrachtung von RSF		Zusätzliche Sicherheitsreserve / Schutzfunktion für den ewG
Deckgebirge		
Wegen Standortabhängigkeit keine Sicherheitsfunktion ausgewiesen. Berücksichtigung des Deckgebirges bei Einwirkung externen Szenarien		Zusätzliche Sicherheitsreserve / Schutzfunktion für den ewG

Das Oberflächenlager ist modular aufgebaut. Die etwa 1.900 in der Bundesrepublik Deutschland erforderlichen Transport- und Lagerbehälter sind also auf mehrere direkt aneinander angrenzende Bauwerke am Standort verteilt (Röhlig u. a., 2016). Die durch den Zerfall von Atomkernen im radioaktiven Inventar der Behälter freigesetzte Wärme wird zur Vermeidung von Schäden an Behälter und Inventar in die Umwelt abgeführt. Hierzu wird ein – im kerntechnischen Sinn – passives Sicherheitssystem eingesetzt. Die Lagergebäude besitzen an der Seite Lufteinlass- und an der Decke Luftauslassschlitze. Durch die über den Behälterkörper aus seinem Inneren abgegebene Wärme entsteht ein konvektiver Luftstrom durch das Lagergebäude, mit dem die Wärme in die Umgebung abgegeben wird.

Behälter und Inventar sind Belastungen durch die in den hoch radioaktiven Abfällen entstehende ionisierende Strahlung und Wärme sowie Wärmewechsel und Alterung ausgesetzt. Wenn die beladenen Behälter zur Oberflächenlagerung angeliefert werden, wurden sie bereits mehrere Jahrzehnte an ihren bisherigen Standorten zwischengelagert. Wegen der Ungewissheiten zum längerfristigen Verhalten von Hüllrohren und Strukturteilen der Leichtwasserreaktor-Brennelemente wird jedes Brennelement, ohne es vorher zu zerlegen, mit einer Büchse gekapselt (Röhlig u. a., 2016). Darüber hinaus erfolgt nach einer Lagerung von etwa 100 Jahren eine Inspektion von Behältern und allen Inventaren (gekapselte Leichtwasserreaktor-Brennelemente, andere Brennelementtypen und Kokillen) und im Falle von nicht mehr spezifiziertem Zustand des Behälters ein Umladen in neue oder instandgesetzte Transport- und Lagerbehälter.

Für die wegen der langen Lagerzeit aus Vorsorgegründen vorgesehenen Kapselung, Inspektion und Umladung ist am Standort eine „Heiße Zelle“ erforderlich. Die Heiße Zelle dient außerdem zur Durchführung der nach Atomgesetz vorgeschriebenen Periodischen Sicherheitsüberprüfung von Behälter und Inventar, sowie für Wartung und Reparatur, wenn an einem Behälter ein Dichtheitsverlust auftritt (Röhlig u. a., 2016). Die Heiße Zelle befindet sich in einem Gebäude mit zum Lagergebäude vergleichbarer Auslegung gegen Einwirkungen von außen und gewährleistet eine weitgehende Rückhaltung von bei Behälteröffnung und Inventarhandhabung freigesetzten Radionukliden sowie eine vollständige Abschirmung von Direktstrahlung.

3.2.5 Referenzmodelle: Grundlage der Untersuchungen zu Tiefenlagern in den Vertikalprojekten 5 und 6

Das Tiefenlager muss einige von den Wirtsgesteinen zunächst unabhängige Funktionen erfüllen. Wie bereits erwähnt, ist das Ziel die Überführung in ein wartungsfreies Endlager nach der Feststellung der planmäßigen oder einer positiveren Entwicklung des Tiefenlagers und seiner Subsysteme zur Erreichung der vorgegebenen Schutzziele. Bis dahin ist eine zügige und einfache Rückholung zu gewährleisten. Dies bedingt, dass die Infrastrukturhohlräume offengehalten und die bergbauliche Sicherheit des Tiefenlagers erhalten werden. Die technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren dürfen nur soweit degradieren, dass die Integrität immer noch ausreichend ist, um die Schutzziele zu erreichen.

In den Vertikalprojekten 5 und 6 ist unter Federführung von Vertikalprojekt 6 (IGB) zunächst eine Konfiguration (generisches Referenzmodell) für das Tiefenlager mit Überwachung und Rückholbarkeit entwickelt worden, die eine Überwachung des Endlagersystems über einen gewissen Zeitraum nach der Einlagerung ermöglicht (Stahlmann u. a., 2015). Eine solche messtechnische Überwachung der Zustandsänderungen der technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren kann der Überprüfung der den Planungen und Sicherheitsanalysen zugrundeliegenden geowissenschaftlichen, physikalischen und chemischen Annahmen und Modellen sowie der Vergrößerung der Datenbasis dienen und letztlich eine Entscheidung über einen endgültigen Verschluss des Lagers oder aber eine Rückholung der Abfälle stützen. Das Tiefenlager mit Rückholbarkeit und Überwachung ist daher planerisch so zu gestalten und umzusetzen, dass die eingelagerten radioaktiven Reststoffe auf der Grundlage bereits geplanter Prozesse zurückgeholt werden können. Ziel ist die Überführung des Tiefenlagers in ein wartungsfreies Endlager, es sind jedoch Fehlerkorrekturen (bis hin zur Rückholung) möglich. Überwachung und Rückholbarkeit sind ein Beitrag zur Reversibilität innerhalb des Lebenszyklus des Tiefenlagers (Abbildung 3.2).

Der genannte Zeitraum der Beobachtung und Überwachung entspricht der von der ICRP vorgeschlagenen Phase „underground observation“ (Weiss u. a., 2013, S. 31ff). Dieses Konzept wurde auch von der Endlagerkommission als „Etappe 4: Beobachtung vor Verschluss des Endlagerbergwerks“ empfohlen (Endlagerkommission, 2016, S. 269ff). In beiden Empfehlungen erfolgen keine Aussagen zur Dauer einer solchen Phase bzw. Etappe.

Ausgangspunkt für die Referenzmodelle waren die existierenden Endlagerkonzepte insbesondere in Deutschland, der Schweiz, Frankreich,

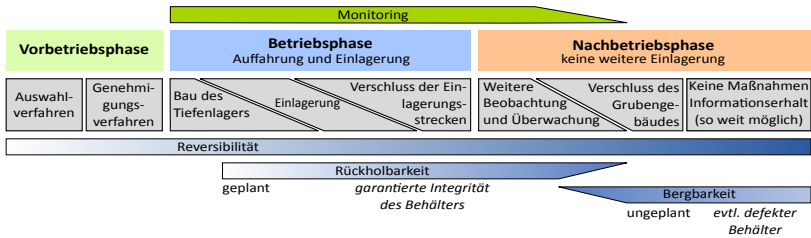


Abbildung 3.2: Lebenszyklus eines Tiefenlagers mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit und Monitoring.

Schweden und Finnland. Das generische Referenzmodell ist als Grundlage für die Gegenüberstellung der Eignung potenzieller Wirtsgesteine gedacht. Es ermöglicht einen Vergleich der den potenziellen Wirtsgesteinen angepassten Tiefenlagerkonzepten aus geotechnischer Sicht ohne Angabe zu konkreten Standorten. Es diente auch als Grundlage zur internen Diskussion in der ENTRIA-Forschungsplattform und für mehrere weitere Arbeitspakete.

Abbildung 3.3 zeigt das generische Referenzmodell für ein Tiefenlager mit Vorkehrungen zur Rückholung und Monitoring. Folgende Annahmen wurden getroffen: Die Reststoffe werden in ENCON-Behältern mit den Abmessungen eines POLLUX-Behälters entsprechend dem Stand der Technik in Deutschland in horizontale Strecken eingelagert. Die Einlagerungssohle sollte zeitnah versetzt und verschlossen werden. Zur Gewährleistung der Rückholbarkeit werden die Infrastrukturbereiche, wie Schächte, Betriebsräume und Zufahrtsstrecken, jedoch maximal so lange offengehalten, wie es gebirgsmechanisch möglich ist. Daraus ergibt sich eine Eingrenzung des Offenhaltungszeitraums aus geotechnischer Sicht. Nach der Einlagerung der Behälter werden die Einlagerungsstrecken versetzt und mit einem Abschlussbauwerk verschlossen. Für das Monitoring des Nahfeld-Bereichs ist 40 m über der Einlagerungssohle eine Monitoringsohle (Überwachungssohle) vorgesehen. Diese Sohle wird ebenso bis zur Entscheidung über die Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager bzw. eine Rückholung offen gehalten. Bei der Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager werden die offengehaltene Infrastruktur und die Monitoringsohle mit ihren Bohrlöchern qualifiziert verfüllt.

Die Monitoringsohle kann in einer ersten Phase des Projekts als Erkundungsohle genutzt werden. Nach Beendigung der Einlagerung wird sie noch für einen längeren Zeitraum von einigen Jahrzehnten, im Extremfall einigen hundert Jahren offen gehalten. Sie eröffnet über Messbohrlöcher

die Möglichkeit zur direkten Überwachung sicherheitsrelevanter Aspekte des Tiefenlagerbergwerksverhaltens auf der Einlagerungssohle. Das Monitoring kann einerseits das langfristige Verhalten der Einlagerungsbehälter bezüglich Beanspruchung, Korrosion und Dichtheit im Hinblick auf Radionuklidfreisetzung und Erhalt der Rückholbarkeit bzw. der Bergbarkeit betreffen, andererseits aber auch die Entwicklung der geologischen und geotechnischen Barrieren bezüglich des Konvergenzverhaltens der Einlagerungsstrecken und der Versatzdruck-, Temperatur- und Fluidphasenentwicklung innerhalb der Einlagerungsstrecken und im Nahfeld des Tiefenlagerbergwerks.

Das Monitoring der Einlagerungssohle könnte über Bohrlöcher erfolgen, die aus der Überfahrungssohle direkt in die Einlagerungsstrecken abgeteuft werden, um über diese Bohrlöcher die Installation und gegebenenfalls auch die Wartung von Messinstrumenten in der Einlagerungssohle und in ihrem Umgebungsbereich zu ermöglichen (Abbildung 3.3). Das Abteufen der Monitoringbohrlöcher sollte zumindest teilweise vor der Einlagerung der Abfallbehälter erfolgen, um die im Tiefenlagerbergwerk ablaufenden Prozesse von Anfang an beobachten zu können. Die Beobachtung des Tiefenlagerverhaltens auf der Einlagerungssohle über Bohrlöcher kann bei entsprechender Positionierung der Bohrlöcher sowohl im Bereich der Abfallbehälter als auch im Versatzbereich zwischen den Behältern erfolgen, z. B. durch bereits während der Einlagerung installierte Messstationen in danach versetzten Streckenbereichen. Die Bohrlöcher sollten derart angelegt werden, dass eine Reparatur bzw. ein Austausch defekter Messinstrumente möglich sein sollte. Auch ist bei Ausfall von Messgebern oder bei fraglichen Messdaten ein späteres Abteufen zusätzlicher Messbohrlöcher mit neuer Instrumentierung möglich. Hinsichtlich der Anzahl und Position der Messbohrungen sind zwei unterschiedliche Ansätze vorstellbar: Besteht der Anspruch einer vollständigen Überwachung des Systems, werden Anzahl und Position u. a. durch die identifizierten Homogenbereiche bestimmt. Ist das Ziel der Überwachung jedoch die Bestätigung, dass sicherheitsrelevante Prozesse im Grundsatz richtig verstanden und prognostiziert wurden, ist lediglich das Monitoring ausgewählter Behälter, Versatzbereiche und Verschlüsse erforderlich.

In der Einlagerungssohle werden die HAW in selbstabschirmenden ENCON-Behältern in horizontalen Blindstrecken eingelagert. Jede Strecke wird mit sechs ENCON-Behältern mit jeweils einer Behälterlänge Abstand zueinander bestückt und sofort nach der Einlagerung verfüllt. Die Strecken werden, sobald die Verfüllung abgeschlossen ist, jeweils mit einem Verschlussbauwerk vom offengehaltenen Grubengebäude abgetrennt.

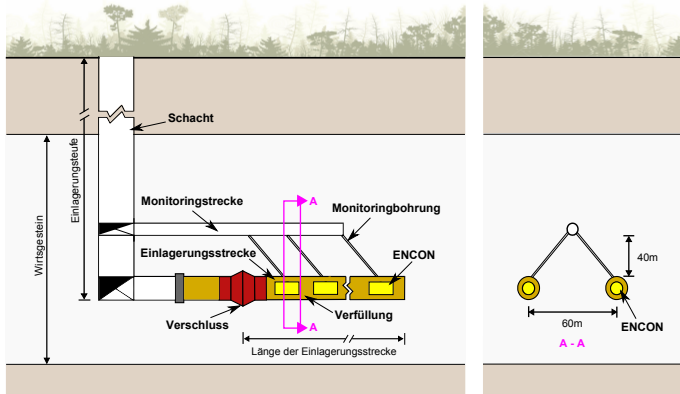


Abbildung 3.3: Generisches Tiefenlagermodell (Stahlmann u. a., 2015).

Die Konfiguration für die im Vertikalprojekt 5 betrachtete Option „Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (wartungsfreie Tiefenlagerung)“ ist soweit als möglich zu derjenigen für Vertikalprojekt 6 identisch, es werden jedoch keine Monitoringstrecken sowie ein frühestmöglicher Verschluss des Lagers angenommen.

Dem Versatz, dem Abschlussbauwerk sowie der geologischen Barriere kommen je nach Wirtsgestein unterschiedliche Funktionen zu (vgl. auch 3.2.3). Im Salzgestein (siehe Abbildung 3.4) übernimmt der Versatz mit Salzgrus eine die Hohlraumwandungen stützende Wirkung, die sich allerdings erst mittelfristig mit der Kompaktion des Salzgruses entwickelt. Mit der Kompaktion einher geht die Verringerung der Permeabilität, die langfristig die Abdichtung der Einlagerungshohlräume gegen zutretende Lösungen darstellt. Die Kompaktion ist abhängig von den Kriecheigenschaften und den Konvergenzen, die wiederum eine Ausdehnung der Auflockerung der hohlraumnahen Bereiche in der Wirtsgesteinsbarriere bewirken. Der Abschlussdamm verhindert eine Entwicklung der Auflockerungszone in diesem Bereich und reduziert die Permeabilität. Er bildet das kurzfristig wirksame Abdichtungselement. Das Salzgestein bildet die eigentliche hydraulische und mechanische Barriere.

Im Ton, Tonstein und kristallinen Hartgestein ist Bentonit als Versatzmaterial vorgesehen, wie exemplarisch für Tonstein in der Abbildung 3.5 dargestellt wird. Es quillt infolge des natürlichen Wasserdargebots dieser Wirtsgesteine und verschließt die aufgefahrenen Hohlräume aufgrund

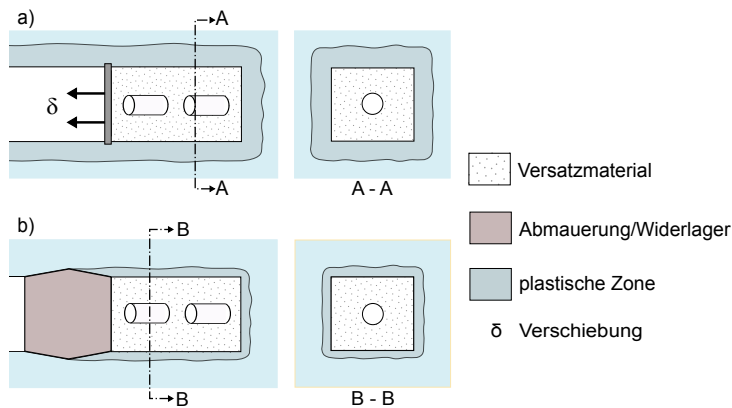


Abbildung 3.4: Auflockerungszone in Steinsalz, Verschluss durch a) eine Abmauerung, b) ein Widerlager.

seiner niedrigen Permeabilität. Voraussetzung hierfür ist der Aufbau eines Quelldrucks. Dieser behindert die weitere Entwicklung der plastischen Zonen in die geologische Barriere hinein. Dem Abschlussbauwerk kommt im Ton und Tonstein im Wesentlichen die Bedeutung eines Widerlagers zu, der den Quelldruck aufnimmt und in das Gebirge ableitet. Ton und Tonstein stellen die eigentlichen hydraulischen Barrieren dar.

Das kristalline Hartgestein übernimmt infolge von wasserführenden Trennflächensystemen keine belastbare hydraulische Barrierefunktion. Hier ist der Einschluss der Abfälle durch einen langlebigen Behälter zu leisten. Der umgebende Bentonitversatz leistet mechanischen Schutz und ermöglicht ein günstiges hydrogeochemisches Milieu („Puffer“). Im Fall eines Behälterdefekts behindert er die Migration von Schadstoffen.

Entsprechend müssen die Tiefenlagerkonzepte an die in Frage kommenden Wirtsgesteine adaptiert werden. Grundlage dafür sind die unterschiedlichen Materialeigenschaften der Wirtsgesteine, die im Folgenden näher erläutert werden.

Beschreibung der Eigenschaften der Wirtsgesteine

Im Folgenden wird auf die Materialeigenschaften der geologischen Barrieren näher eingegangen. Trotz der verlängerten Offenhaltung soll das Ziel des Tiefenlagers, der Schutz der Biosphäre, durch die Robustheit der Barrieren gewährleistet werden. Grundsätzlich ist der Zutritt von Flüssigkeiten zu den radioaktiven Reststoffen und die sich dann anschließende

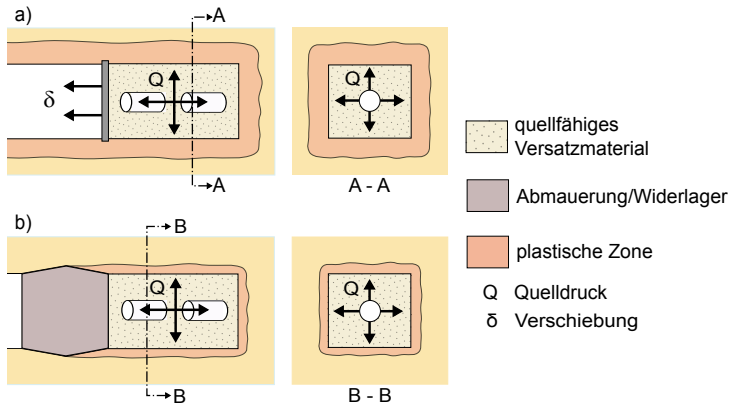


Abbildung 3.5: Auflockerungszone in Tonstein; Verschluss durch a) eine Abmauerung, b) ein Widerlager.

Ausbreitung von Radionukliden zu be- oder verhindern. Mit Ausnahme des kristallinen Hartgesteins spielt dabei das Wirtsgestein als geologische Barriere die Hauptrolle. Es sollte eine möglichst geringe Permeabilität aufweisen. Kommt es dennoch zu einem Zutritt von Flüssigkeiten und eine Freisetzung von Radionukliden, ist es von Vorteil, wenn die geologische Barriere Radionuklide absorbieren kann.

Keines der potenziellen Wirtsgesteine kann alle Materialeigenschaften eines idealen Wirtsgesteins für die Tiefenlagerung radioaktiver Reststoffe erfüllen. Jedes Wirtsgestein weist Vor- und Nachteile auf. Für die Option der Rückholung kommt zusätzlich durch die Gewährleistung der Standsicherheit der Hohlräume über den Zeitraum der Offenhaltungsphase die Eigentragsfähigkeit des Wirtsgesteins als maßgebende Eigenschaft hinzu. Mögliche Gesteinsformationen sind hinsichtlich ihrer Eignung als geologische Barriere eines Tiefenlagers mit Rückholbarkeit daher auch hinsichtlich dieses Aspekts zu bewerten.

Materialeigenschaften von Steinsalz als Wirtsgestein. Steinsalz (NaCl) ist ein relativ homogenes Material. In Deutschland kommt Steinsalz in flacher und steiler Lagerung vor. Steinsalz in flacher Lagerung besitzt gegenüber Steinsalz in steiler Lagerung eine belastbarere Explorierbarkeit und auch das Deckgebirge liegt im Allgemeinen ungestört und söhlig vor.

Steinsalz besitzt eine mittlere Festigkeit und verhält sich bei Verformung viskoplastisch. Diese Kriechfähigkeit wirkt sich im Fall eines Endlagers durch den relativ schnellen vollständigen Einschluss der radioakti-

ven Reststoffe positiv aus. Jedoch ist diese Eigenschaft für ein Tiefenlager nicht zwangsläufig vorteilhaft, denn höhere Konvergenzen beeinträchtigen die Zugänglichkeit des Tiefenlagers durch das Zukriechen der Infrastrukturräume. Ein Nachschneiden führt zu einer Abnahme der Integrität die sich über die Zeit in das Wirtsgestein hinein entwickelt. Eine Ausbausicherung der offenen Hohlräume müsste auf den vollständigen lithostatischen Überlagerungsdruck bemessen werden.

Steinsalz hat im Vergleich zu anderen Gesteinen eine hohe Wärmeleitfähigkeit und auch bei höheren Temperaturen sind keine mineralogischen Veränderungen zu erwarten. Bei zunehmender Temperatur ist eine zunehmende Kriechfähigkeit zu erwarten. Aspekte wie die erforderliche Bewetterung der offengehaltenen Grubengebäude sind ebenfalls zu beachten.

Vorteilhaft ist die sehr geringe Permeabilität des Steinsalzes.

Kritisch zu betrachten ist im Allgemeinen die Wasserlöslichkeit von Steinsalz. Weiterhin besitzt es keine Sorptionsfähigkeit gegenüber Radionukliden im Falle eines Flüssigkeitszutritts in das Grubengebäude und eines Austrags kontaminierter Lösung.

Materialeigenschaften von kristallinem Hartgestein. Der Begriff „kristallines Hartgestein“ definiert im Kontext der Tiefenlagerung eine Vielzahl mineralologisch unterschiedlicher, mechanisch fester Gesteine, magmatischer oder metamorpher Genese. Der Hauptvorteil kristalliner Hartgesteine ist die hohe mechanische Stabilität, die nur eine geringe bis keine Hohlraumsicherung bedingt. Nur in stärker geklüfteten, d. h. mit Trennflächensystemen durchzogenen Bereichen ist ein Ausbau erforderlich. Die Festigkeit des Gebirges wird überwiegend von den Trennflächen bestimmt, sodass eine genaue Trennflächenkartierung und -ansprache im Kristallin notwendig ist.

Hohe Temperaturen haben keine Auswirkungen auf das Mineralgefüge von kristallinem Hartgestein. Die Wärmeleitfähigkeit hängt vom Mineralbestand ab und ist im Allgemeinen gut, allerdings geringer als beim Steinsalz.

Die Trennflächen stellen weiterhin einen Kluftgrundwasserleiter dar. Infolgedessen ist ein Grundwasserzufluss in das Tiefenlager zu erwarten. Während der Betriebsphase ist somit eine ausreichende Wasserhaltung erforderlich. Eine hydraulische Barrierewirkung kann kristallines Hartgestein nicht zugewiesen werden. Zudem besitzt kristallines Hartgestein nur eine geringe bis keine Sorptionsfähigkeit. Infolgedessen ist es nicht als geologische Barriere wirksam.

Materialeigenschaften von Ton. Der Begriff „Ton“ wird im Kontext der Endlagerung oft synonym zum Begriff „Tonstein“ gebraucht, beide Gesteine verhalten sich aber sehr unterschiedlich.

Ton hat ein plastisches Materialverhalten und einen geringen Verformungsmodul, sodass kleine Spannungen große Verformungen erzeugen. Im Ton aufgefahrene Hohlräume sind in Abhängigkeit von dessen Konsistenz und Überkonsolidierung nur kurzzeitig ohne Ausbau standsicher. Wird ein tief liegender Hohlraum in diesem Gebirge aufgefahren, kann die daraus resultierende Spannungsumlagerung nicht über das Gebirge abgetragen werden. Da sich kein Gebirgstragring ausbildet, muss der erforderliche Ausbau die Spannungen aus der Überlagerung aufnehmen. Dabei ist zu beachten, dass ein größer dimensionierter Ausbau zu einer erhöhten Menge an korrosivem Material im Tiefenlagersystem führt, sodass es bei Korrosionsprozessen zu vermehrter Gasbildung kommt.

Ton zeigt eine starke Temperaturempfindlichkeit. Die hohen Temperaturen der wärmeentwickelnden Reststoffe führen zu Mineralumbildungen und Austrocknung. Dadurch verliert der Ton seine Quelfähigkeit und somit seine abdichtenden Eigenschaften.

Ton besitzt eine geringe Permeabilität. Bei Wasserzutritt erfolgt außerdem ein Selbstabdichten der Trennflächen, was seine Permeabilität zusätzlich verringert. In Ton befindet sich weitgehend nur stagnierendes Grundwasser, der durch die Belastung aufgebaute Porenwasserdruck kann sich durch die sehr geringe Durchlässigkeit des Tons nicht vollständig abbauen.

Eine positive Eigenschaft des Tons ist die Sorptionsfähigkeit gegenüber Radionukliden.

Materialeigenschaften von Tonstein. Tonstein ist ein durch Kompaktierung verfestigter Ton. Die für Deutschland in Frage kommenden Tonsteinformationen sind überkonsolidiert und zeigen spannungsinduzierte Probleme (Quetschungen / Squeezing). Vorteilhaft gegenüber Ton ist die höhere mechanische Stabilität des Tonsteins, die kurz- bis mittelfristig einen geringeren Aufwand in der Hohlraumsicherung bedeutet. Das Spannungsmilieu ist durch die Trennflächen stark anisotrop.

Tonstein besitzt eine anisotrope Wärmeleitfähigkeit und ist gegenüber thermischen und chemischen Einflüssen weniger sensibel als Ton. Das Trennflächensystem stellt potenzielle Wasserwegsamkeiten dar. Generell kann aber davon ausgegangen werden, dass ungestörte Tonsteine eine geringe Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Genauso wie Ton besitzen die Tonminerale des Tonsteins die Fähigkeit, Radionuklide zu absorbieren.

Tabelle 3.2: Zusammenfassung der Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine für die Tiefenlagerung.

Ziel	Eigenschaft	Steinsalz	Ton	Tonstein	Kristallines Hartgestein
	Primärer Spannungszustand	isotrop	schwach anisotrop	anisotrop	anisotrop
	Plastizität und Kriechverhalten	kriechfähig	plastisch	leicht plastisch	spröde
	Trennflächensystem	keine offenen Trennflächen	latent vorhanden	stark ausgeprägt	Kluftnetzwerk
Zugänglichkeit	Langzeiteigentragsfähigkeit	gering	gering	mäßig	hoch
	Konvergenzen	hoch	hoch	mittel	sehr gering
Langzeitsicherheit	Auflockerungszonen	groß	groß	groß	klein
	Selbstverheilung	ja	ja	mäßig	nein
	Grundwasser im Tiefenlager	nicht vorhanden	stagnierendes Grundwasser	stagnierendes Grundwasser, möglicher Grundwasserfluss an Trennflächen	Kluftgrundwasserleiter

Gegenüberstellung der Wirtsgesteinseigenschaften

Keines der beschriebenen Wirtsgesteine kann alle Anforderungen an ein ideales Wirtsgestein für die Tiefenlagerung radioaktiver Reststoffe erfüllen. Für die Rückholbarkeit sollen die Ziele der Zugänglichkeit und Langzeitsicherheit sichergestellt werden.

Mechanische Langzeitstabilität stellt den Schlüsselfaktor für die Zugänglichkeit dar. Für die Langzeitsicherheit sind besonders eine geringe Durchlässigkeit, eine geringe Löslichkeit und ein plastisches Verformungsverhalten relevante Eigenschaften. Letzteres fördert die Verheilung von potenziellen Trennflächen. Darüber hinaus ist bei der Lagerung hoch radioaktiver wärmeentwickelnder Reststoffe die Wärmeleitfähigkeit von großer Bedeutung. Tabelle 3.2 stellt die wesentlichen Eigenschaften der Wirtsgesteine mit Berücksichtigung der beiden Ziele, Zugänglichkeit und Langzeitsicherheit, qualitativ gegenüber.

Auf Grundlage der Eigenschaften der infrage kommenden Wirtsgesteine ist es erforderlich, die Bandbreite möglicher Szenarien für die Umsetzung der Rückholung einzugrenzen. An dieser Stelle stehen die Kriterien für den Erhalt der Funktionsfähigkeit der technischen und geotechnischen Barrieren sowie der Erhalt der Integrität der geologischen Barriere in Abhängigkeit der verschiedenen Wirtsgesteine im Vordergrund. Genauso ist ein geeignetes Monitoring des Tiefenlagersystems ein wichtiger Aspekt (vgl. Abschnitt 3.6).

3.2.6 Annahmen zu Oberflächenlagern

Die Spezifizierung der Langfristzwischenlagerung resultierte nicht in einem konkreten Anlagenkonzept bzw. einem Gebäudeentwurf, sondern vorwiegend in der Formulierung von Anforderungen und technischen Merkmalen. Technisch optimierte Systeme setzen sich häufig aus einer Kombination verschiedener, bereits vorhandener Komponenten oder Merkmale zusammen. Eine Festlegung auf eine bestimmte Anlagengröße, Behälterart oder Bauweise hätte schon frühzeitig zu einer eingeschränkten Betrachtung dieser Option geführt, die angesichts der Vielfalt technischer Systeme und Lösungsansätze nicht zielführend erschien. Darüber hinaus hätte ein als „Referenz“ bezeichnetes Konzept – nicht intendiert – als Empfehlung für ein Anlagenkonzept missverstanden werden können. Für den risikobezogenen Vergleich der Entsorgungsoptionen wurden daher lediglich die dafür notwendigen Eckpunkte festgelegt.

Eine zentrale Randbedingung ist in Bezug auf das Vertikalprojekt 7, dass es sich bei der untersuchten längerfristigen Zwischenlagerung um eine eigenständige, bewusst gewählte Option und nicht um eine durch Sachzwänge begründete verlängerte – notwendige – Zwischenlagerung handelt (vgl. Abschnitt 5.7). Als betrachteter Zeitraum wurde für die Langfristzwischenlagerung von mindestens $100 + x$ Jahren ausgegangen, wobei für x zwischen 50 und 100 Jahre angesetzt werden können. Für die Anlagenauslegung ergab sich daher in Übereinstimmung mit internationalen Überlegungen eine angestrebte Nutzungsdauer von mindestens 100 Jahren. Wegen sicherheitstechnischer Nachteile im Hinblick auf lange Auslegungszeiträume und der ebenfalls zu berücksichtigenden Wiederaufarbeitungsabfälle wurden Brennelementlagerbecken nicht als technische Variante in den Optionenvergleich mit einbezogen.

Als Eckpunkte für die Konzeptionierung eines Langfristzwischenlagers wurde wegen des hohen Schutzbedürfnisses davon ausgegangen, dass Gebäude und Behälter weitgehend redundant hinsichtlich der mechanischen Barrierefunktion ausgelegt sein sollten – sofern möglich, sollten sowohl Gebäude als auch Behälter allein ausreichend Widerstandsfähigkeit gegenüber den zu berücksichtigenden Einwirkungen besitzen. Mangels anderer Konzepte mit vergleichbarer Schutzfunktion wurde daher von der Verwendung von Transport- und Lagerbehältern ausgegangen. Die Bauwerke wären im Vergleich zu heutigen Konzepten zu ertüchtigen und würden, z. B. durch die Vergrößerung der Querschnitte, auch höheren Anforderungen an die Abschirmung genügen. Darüber hinaus wurde von einem Lagergebäude ausgegangen, das aus Einzelsegmenten besteht, sodass Schadensauswirkungen begrenzt werden können – entsprechende Notfalleinrichtungen müssten jeweils autark verfügbar sein. Die Errich-

tung von Einzelsegmenten ermöglicht darüber hinaus das Umsortieren von Behältern für Instandsetzungsarbeiten. Eine weitere Randbedingung ist ein aktives Klimatisierungssystem, das im Normalbetrieb Korrosionseffekte minimieren soll und im Fall von Behälterundichtigkeiten vorübergehend durch den Verschluss von Gebäudeöffnungen als umschließende Barriere aktiv werden kann. Eine passive Kühlung müsste bei Ausfall des aktiven Klimatisierungssystems dennoch sicher gewährleistet werden.

Die Zwischenlagerung in Transport- und Lagerbehältern beinhaltet implizit die Aussagen, dass es keine Vorfestlegung auf ein Wirtsgestein geben muss und ein Umladen vor der Endlagerung erforderlich sein wird. Auch unter dem Aspekt der Langfristsicherheit müsste daher eine Heiße Zelle als Konditionierungseinrichtung an den Standorten verfügbar sein. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, die Handhabbarkeit der Brennelemente (z. B. durch eine Kapselung der BE) über einen langen Zeitraum gewährleisten zu können.

3.2.7 Szenarien und Rechenfälle

Ausgehend von den beschriebenen Referenzmodellen waren für die Untersuchung des Systemverhaltens von Tiefenlagern nach deren Verschluss (Langzeitsicherheit) weitere Verabredungen zwischen den beteiligten Arbeitsgruppen auf zwei Ebenen notwendig: Zum einen erforderte die numerische Modellierung, dass phänomenologisch gestützte Annahmen zur künftigen Systementwicklung (Szenarien) zugrunde gelegt werden, zum anderen mussten Vereinbarungen zum Datenaustausch getroffen werden: Die Modelle zur Radionuklidmigration (Arbeitspaket 5.3, IELF) benötigten einerseits Quellterme (Arbeitspaket 4.4, INE), andererseits Daten zu Fluidströmen (Arbeitspakete 5.1, 5.2 und 6.7mod, LfDG).

Wegen des fehlenden Standortbezugs bzw. der in ENTRIA vorgesehenen generischen Betrachtung der Entsorgungsfrage erfolgte keine systematische Szenarienentwicklung. Stattdessen wurden anhand von phänomenologischen Überlegungen exemplarische Szenarien als Grundlage für Rechenfälle festgelegt. Die Rechenfälle hatten unterschiedliche Funktionen: Einige Rechenfälle fungierten als Testfälle für einzelne Modelle, andere sollten als Grundlage für Bewertungen herangezogen werden. Schließlich wurden auch Randbedingungen verabredet, die zum Vergleich der Ergebnisse für unterschiedliche Modellannahmen genutzt werden. U. a. wurden folgende Rechenfälle definiert:

- unterschiedliche Wirtsgesteinstypen

- Tiefenlager mit bzw. ohne Vorkehrungen zu Rückholbarkeit und Monitoring
- (ungestörter) Normalzustand bzw. mit geotektonische Schwachstellen
- ein ordnungsgemäß verschlossenes Tiefenlager bzw. ein offen gehaltenes, sich dann aber selbst überlassenes Tiefenlager
- Zustrom NaCl-dominierten Lösungen sowie MgCl_2 -dominierter Lösungen

Entwicklung des Tiefenlagers

Im Rahmen der in den ENTRIA-Teilprojekten AP 5.1 und AP 5.2 sowie AP 6.7mod durchgeführten Arbeiten sind mit Hilfe von Globalmodell-Simulationen verschiedene Entwicklungsszenarien für ein generisches Tiefenlager- / Endlagersystem in den Wirtsgesteinsformationen Salinar-gebirge bzw. Tonsteingebirge analysiert worden, um so einen ersten Eindruck über die insbesondere fluiddynamisch orientierte Sensitivität des Systemverhaltens zu erhalten hinsichtlich einer Variation der Anlagenkonfiguration sowie der Materialkennwerte und / oder der Berücksichtigung von geotektonischen Störungszonen. Wie oben angemerkt, ist eine umfassende systematische Szenarienanalyse auf der Grundlage von FEP-Katalogen allerdings nicht durchgeführt worden. Vielmehr sind Szenarien definiert und untersucht worden, die zunächst eine typische Normalentwicklung der Anlage in Verbindung mit Parameterbandbreiten repräsentieren. Darüber hinaus sind weitere Szenarien untersucht worden, in denen geologische Defekte in dem jeweiligen einschlusswirksamen Gebirgsbereich unterstellt werden (z. B. Salzlösungsnester im Salinar-gebirge und hydraulisch wirksame Störungszonen im Tonsteingebirge). Eine Unterscheidung in wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungsszenarien erfolgt dabei explizit nicht, da die Eintrittswahrscheinlichkeit der Szenarien nicht untersucht worden ist. Die rechnerischen Simulationen orientieren sich an der jeweiligen zeitlichen Entwicklung des Tiefenlager- / Endlagersystems mit

- der Auffahrung des Schachtes,
- der Auffahrung der Überwachungssohle und der Monitoringbohrlöcher (nur im Fall des Tiefenlager- / Endlagersystems mit längerfristigem Monitoring),

- der Auffahrung der Richtstrecke zwischen dem Schacht und den Einlagerungsfeldern,
- der Auffahrung zunächst der Umfahrungsstrecken um die Einlagerungsfelder (= außen liegende Richt- und Verbindungsstrecken) zur Verbesserung der Betriebssicherheit bei gleichzeitiger Erkundung der lokalen geologischen Verhältnisse und anschließend der inneren Verbindungsstrecken,
- der Auffahrung der Einlagerungsstrecken beginnend zunächst in dem am weitesten vom Schacht entfernten Einlagerungsfeld und dort mit den drei am weitesten vom Schacht entfernten Einlagerungsstrecken,
- der im Rückbauverfahren erfolgenden Bestückung der zuerst aufgefahrenen Einlagerungsstrecke mit insgesamt elf Abfallbehältern bei parallel erfolgendem Versatz der verbleibenden Hohlräume dieser Strecke und Anordnung eines Kammerverschlussbauwerks,
- der Auffahrung einer weiteren Einlagerungsstrecke mit anschließender Wiederholung der Betriebssequenz in analoger Art und Weise, wobei stets zwei bis drei Einlagerungsstrecken offen gehalten werden,
- dem Versatz nicht mehr benötigter Umfahrungsstrecken mit Anordnung von Streckenverschlussbauwerken,
- dem Versatz der Richtstrecke zum Schacht nach Ende des Einlagerungsprozesses,
- gegebenenfalls der Offenhaltung des Schachts, der Überwachungssohle und der Monitoringbohrlöcher bis zum Ende der Monitoringphase,
- Verfüllung und Verschluss der Monitoringbohrlöcher und der Überwachungssohle nach Ende der Monitoringphase und
- Verfüllung und Verschluss des Schachts.

Untersuchungen zur Standsicherheit der Hohlräume während der Monitoringphase werden in Vertikalprojekt 6 durchgeführt. Hier wird davon ausgegangen, dass für einen bestimmten Zeitraum nach Verschluss der Einlagerungssohle die Standsicherheit noch als gegeben vorausgesetzt werden kann.

Beschreibung relevanter Zustandsgrößen

Mit Hilfe der durchgeführten Globalmodell-Simulationen konnte die räumlich-zeitliche Entwicklung relevanter physikalischer Zustandsgrößen eingeschätzt werden, z.B. der Temperatur, des Sättigungsgrades, des Porendrucks und der Porosität sowie der Permeabilität im Versatzmaterial und im umgebenden Gebirge. Zudem konnten auch potentielle Flüssigkeits- und Gasströmungspfade identifiziert werden. Daten zur räumlich-zeitlichen Entwicklung der Flüssigkeits- und Gasströmungen sind zur weiteren Verwendung an das Arbeitspaket 5.3 übergeben worden, in dem mit Hilfe des Programms ReSUS probabilistische Simulationen zum advektiv und diffusiv getragenen Radionuklidtransport durchgeführt werden. Die durch die Globalmodell-Simulationen erhaltenen Informationen zum langfristigen Systemverhalten des Tiefenlager- / Endlagersystems im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge und der ablaufenden fluiddynamischen Prozesse können zudem herangezogen werden einerseits bei der Planung eines geeigneten Monitoringkonzepts und andererseits bei der monitoringbasierten Erfassung und Bewertung des tatsächlichen Tiefenlager- / Endlagerverhaltens. Auf diese Art und Weise können Fehlentwicklungen frühzeitig erkannt werden, wodurch sich die Möglichkeit zur Fehlerkorrektur ergibt. Bild 3.6 zeigt exemplarisch Simulationsergebnisse zur zeitlichen Entwicklung der vorstehend genannten Zustandsgrößen in der Nähe eines Einlagerungsbehälters für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge.

Langzeitentwicklung von Tiefenlager- und Endlagersystemen

Anhand der durchgeführten Globalmodell-Simulationen konnte auch der Einfluss einer Überwachungssohle mit Monitoringbohrlöchern auf das längerfristige Systemverhalten der generischen Tiefenlager- / Endlagersysteme im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge sowie auf die ablaufenden fluiddynamischen Prozesse eingeschätzt werden. Diese Einschätzung beruht auf einer vergleichenden Betrachtung der berechneten räumlich-zeitlichen Entwicklung der relevanten Zustandsgrößen für das Endlagersystem mit zeitnaheem Verschluss nach Ende des Einlagerungsprozesses und des Tiefenlager- / Endlagersystems mit längerfristigem Monitoring auch noch nach Ende des Einlagerungsprozesses und Verschluss der Einlagerungssohle.

Im Rahmen der vergleichenden Betrachtung haben sich in Abhängigkeit vom betrachteten Entwicklungsszenario mehr oder weniger große Unterschiede in der längerfristigen Systementwicklung und den ablaufenden fluiddynamischen Prozessen gezeigt.

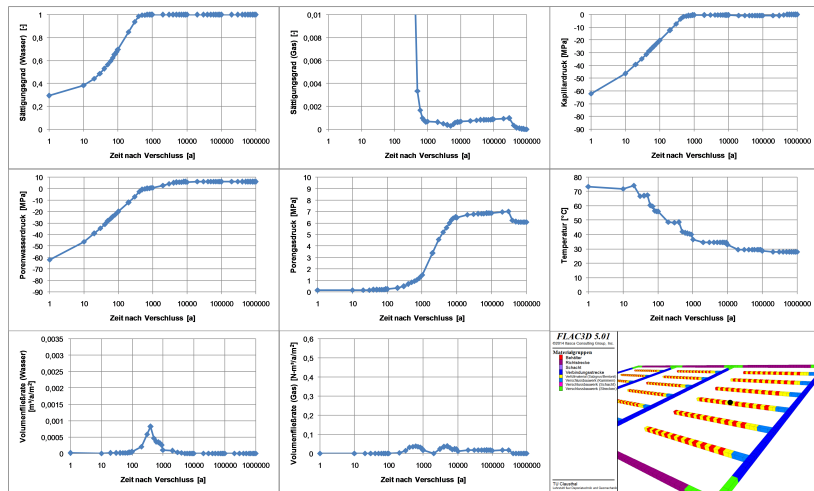


Abbildung 3.6: Zeitliche Entwicklung von Zustandsgrößen in der Nähe eines Einlagerungsbehälters für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge.

3.2.8 THM Modellierung (nach Überführung in ein Endlager)

Methodische Ansätze zur grundlegenden Abstraktion des Endlagersystems und seiner Entwicklung

Im Rahmen von Forschungsprojekten mit generischen Endlagerkonfigurationen und von standortbezogenen Endlagerprojekten sind in den vergangenen Jahren Langzeitsicherheitsanalysen durchgeführt worden. Dabei sind vornehmlich die Integrität der Barrieren (zum Beispiel des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs – ewG) sowie die vom Integritätszustand abhängigen fluiddynamischen Prozesse im verschlossenen Endlager betrachtet worden, weil hieraus potentiell eine Freisetzung von Radionukliden resultiert, die ggf. zu einer Verletzung der Schutzziele (zusätzliche Strahlenbelastung, Grundwasserkontamination) führen kann. Wie für jede numerische Modellierung physikochemischer Systeme sind auch im Fall fluiddynamischer Prozesse wegen der Grenzen hinsichtlich des Prozessverständnisses, der Datenlage und der verfügbaren Simulationswerkzeuge mehr oder weniger umfangreiche Abstraktionen vorzunehmen. In Langzeitsicherheitsanalysen kommen u. a. so genannte Kompartimentmodelle zum Einsatz. In den einzelnen Kompartimenten wird je ein Teilbereich des Endlagers abstrahiert abgebildet. Darüber hinaus

werden die hydraulischen Verbindungen zwischen den Kompartimenten vorgegeben (realitätsnah oder hypothetisch). Der Abstraktionsgrad ist allerdings im Lauf der Zeit dem Fortschritt wissenschaftlicher Erkenntnisse und der simulationstechnischen Möglichkeiten folgend kontinuierlich reduziert worden.

Zentrale Kompartimente sind die Kammern mit den endgelagerten Abfällen (Quelle), das Endlager-Nahfeld (bei Analysen für Systeme im Tonstein oder Steinsalz wird hierunter in der Regel der Teil des Endlagerbergwerks im ewG und dessen geologische Barriere verstanden), das Endlager-Fernfeld (Deck- und Nebengebirgsformationen außerhalb des ewG) und die Biosphäre mit den Schutzgütern (z. B. oberflächennahes Grundwasser, Menschen und menschlicher Lebensraum). Dabei unterteilt sich das Endlagerbergwerk in separat abgedichtete Einlagerungsbereiche und die gegen die Biosphäre abgedichtete Restgrube mit den Infrastrukturgrubenbauen und den Zugangsschächten. Innerhalb dieser zentralen Kompartimente können weiterhin fluiddynamisch orientiert Teilkompartimente definiert werden, wodurch insbesondere der konfigurative Abstraktionsgrad reduziert und dadurch die Realitätsnähe verbessert und auch die Anschaulichkeit gefördert wird. In der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) sowie im Forschungsprojekt ZIESEL ist das jeweils betrachtete Endlagerbergwerk als Röhrensystem schon relativ detailliert abgebildet worden, allerdings unter Vernachlässigung des umgebenden Gebirges, (Kock u. a., 2012), (Kock u. a., 2016).

Langzeitsicherheitsanalysen können, abhängig vom zunächst festzulegenden Sicherheits- und Nachweiskonzept (vgl. z. B. (Mönig u. a., 2010)) u. a. folgende Schritte umfassen:

- Systembeschreibung,
- Identifizierung von standortbezogenen Zuständen, Ereignissen und Prozessen (features, events and processes – FEPs) und systematische Ableitung und Konstruktion u. a. von ggf. migrationsrelevanten Szenarien,
- Analyse der Barrierenintegrität sowie von potentiellen Radionuklid-freisetzungspfaden im Endlager- und Geosystem,
- Identifizierung fluiddynamisch relevanter Mechanismen ausgehend von den FEPs,
- Abbildung des Endlagersystems mit Endlagerbergwerk und umgebenden Geosystem in eine fluiddynamisch analysierbare Struktur mit Untergliederung in Kompartimente,

- Entwicklung von Funktionalmodellen⁵ zur vereinfachten Modellierung von freisetzungsrelevanten physikalischen Prozessen (Konvergenz, Porosität und Permeabilität in Raum und Zeit),
- Ermittlung von Bandbreiten und Verteilungen für fluiddynamisch relevante und radionuklidtransportrelevante Parameter,
- Nutzung zufälliger Parameterkombinationen im Rahmen der identifizierten Bandbreiten und Verteilungen und rechnerische Ermittlung von Fluidströmen und zugehörigem Radionuklidtransport im abstrahierten Endlagersystem vom Endlagerbergwerk in die Biosphäre entsprechend dem jeweiligen Szenario (probabilistische Analyse),
- Bewertung der in die Biosphäre migrierten Radionuklide entsprechend der jeweiligen Schutzziele und Bewertungsmaßstäbe.

Bezüglich des Radionuklidfreisetzungsverhaltens und der Dokumentati-on der Langzeitsicherheit erfolgt in einem Nachweiskonzept gemäß (Mö-nig u. a., 2010) nachfolgende Differenzierung:

⁵Mit den in die Performance-Assessment-Simulatoren (PA-Simulatoren) integrierten Funktionalmodellen, die aus auf die jeweilige Zielgröße der Funktionalmodelle fokus-sierten Lokalsimulationsmodellen abgeleitet worden sind, werden mit stärkerer oder we-niger starker Abstraktion tiefenlager- / endlagerrelevante Prozesse beschrieben, die die Radionuklidmigration aus dem Tiefenlager / Endlager in die Biosphäre durch die geologi-schen und / oder geotechnischen Barrieren bedingen. Dazu gehören als sicherheitstech-nisch relevante Prozesse

- Konvergenz,
- Strömung von Gas und wässrigen Lösungen im Endlagerbergwerk und gegebenenfalls auch in der umgebenden Wirtsgesteinsformation,
- Quelldruckentwicklung,
- Sekundärporositätsentwicklung und
- Sekundärpermeabilitätsentwicklung.

Im Hinblick auf Sekundärporositäts- und Sekundärpermeabilitätsentwicklung sind so-wohl die geologische Barriere wie auch die geotechnischen Barrieren zu betrachten. Die im Rahmen des Forschungsprojekts ENTRIA entwickelten Funktionalmodelle sind (Lux u. a., 2017), (Zhao, 2017) und Lux u. a. (2018) zu entnehmen. Die Berücksichtigung von Wärmeentwicklung und Gasbildung erfolgt in den PA-Simulatoren dagegen nicht in Form eines abstrahierenden Funktionalmodells, sondern als zeitlich-räumliche Einwir-kung, die in den PA-Simulatoren unmittelbar vom Anwender vorgegeben werden kann, so dass keine abstrahierenden Funktionalmodelle benötigt werden. Die Daten zur korro-sionsbedingten Gasbildung sind in Abstimmung mit den Bearbeitern von AP 4.4 sowie von AP 6.5 angesetzt worden. Die Daten zur Wärmeentwicklung der Einlagerungsbehäl-ter sind (Filbert, 2004) entnommen worden.

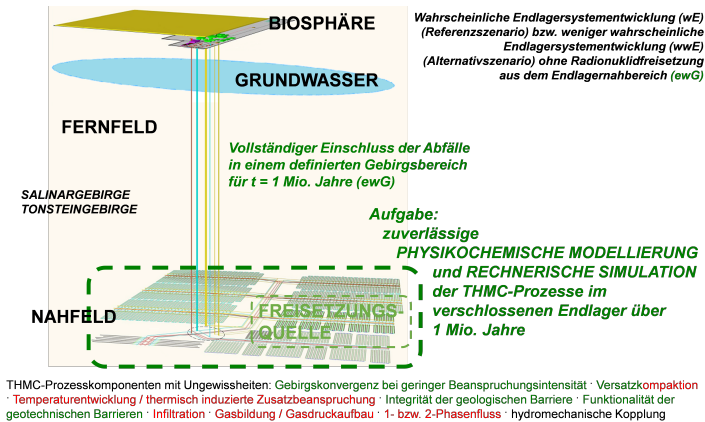


Abbildung 3.7: Szenarien ohne Radionuklidfreisetzung außerhalb des ewG: vollständiger Einschluss.

- Szenarien ohne Radionuklidfreisetzung außerhalb des ewG (Bild 3.7): vollständiger Einschluss⁶ der Radionuklide im ewG (zulässige Endlagerentwicklung),
- Szenarien mit Radionuklidfreisetzung außerhalb des ewG bis in die Biosphäre (Bild 3.8):
 - Einhaltung der für wahrscheinliche bzw. weniger wahrscheinliche Entwicklungen unterschiedlichen Grenzwerte: sicherer Einschluss (BMU, 2010) (zulässige Endlagerentwicklung),
 - keine Einhaltung der Grenzwerte: kein sicherer Einschluss (nicht zulässige Endlagerentwicklung).

Im Fall einer rechnerisch ermittelten und als nicht zulässig bewerteten Radionuklidfreisetzung sind – sofern diese nicht auf reduzierbare Überschätzungen aufgrund von Modellannahmen zurückzuführen ist – entweder Modifikationen / Optimierungen der Endlagerkonzeption bzw. der Endlagerauslegung vorzunehmen oder erweist sich der Standort für die Errichtung eines Endlagers als ungeeignet.

⁶Nach (Kock u. a., 2012) ist ein vollständiger Einschluss einerseits dann gegeben, wenn es zu keinem Kontakt zwischen Lösungen und Abfällen kommt und wenn keine Radionuklide über den Gaspfad aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden, andererseits aber auch dann, wenn es zwar zu einem Lösungskontakt mit den Abfällen kommt, aber keine Radionuklide aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden, und zwar weder über den Lösungspfad noch über den Gaspfad.

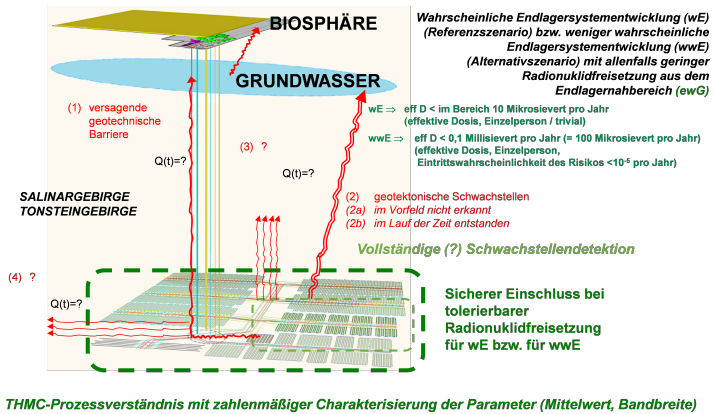


Abbildung 3.8: Szenarien mit Radionuklidfreisetzung außerhalb des ewG bis in die Biosphäre: sicherer Einschluss oder kein sicherer Einschluss.

Diese generelle Vorgehensweise zur Dokumentation der Langzeitsicherheit eines Endlagers wird als methodischer Ansatz auch im Rahmen des Forschungsprojekts ENTRIA für die neue Konzeption des Tiefen-/Endlagers prinzipiell beibehalten, jedoch nicht in allen Schritten ausgeführt. So erfolgt zum Beispiel keine systematische Ableitung von Szenarien (s. Abschnitt 3.2.1), sondern lediglich eine Behandlung von postulierten Rechenfällen.

Sicherheitsprinzip und grundlegende Anforderungen an die Barrieren gegen Radionuklidfreisetzung

Im Rahmen der Endlagerung radioaktiver Abfälle in unterschiedlichen geologischen Salinar- bzw. Tongesteinsformationen ist über eine standortbezogene Nachweisführung nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zu belegen, dass für die zukünftige(n) Standortentwicklung(en) nach Ausführung der Stilllegungsmaßnahmen der dauerhafte sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle im Salinar- bzw. im Tongestein gewährleistet werden kann.

Auf der Grundlage des Entsorgungsprinzips des sicheren Einschlusses für radioaktive Abfälle und des zu seiner Realisierung abgeleiteten Mehrbarrierensystems sind für die wahrscheinliche sowie für weniger wahrscheinliche Entwicklungen die folgenden Einzelsysteme im Hinblick auf

die Gewährleistung ihrer jeweiligen Sicherheitsfunktion zur Realisierung des sicheren Einschlusses zu bewerten:

- natürliche Barrieren (Verhalten des Wirtsgesteins, möglicherweise auch des Nebengesteins und des Deckgebirges),
- technische Eingriffe in die natürlichen Barrieren (Schacht, Grubengebäude, bergbaubedingte Gebirgsauflockerungen, Art der Einbringung der radioaktiven Abfälle),
- (geo-)technische Barrieren (Beschaffenheit der radioaktiven Abfälle und gegebenenfalls Konditionierung, Schacht- und Streckenverschlüsse).

Zentrales Element der Nachweisführung ist die Dokumentation des hinreichenden Erhalts der Integrität der salinaren bzw. der tonigen Schutzschichten hin zu den nichtsalinaren bzw. den nichttonigen (wasserführenden) Neben- und Liegendgebirgsformationen. Zu bewerten sind dabei entsprechend (BMU, 2010)

- die Ausnutzung der Bruch- und Dilatanzfestigkeit der unterschiedlichen Barrierengesteine und weiterer relevanter Gebirgsformationen mit Abdichtungsfunktion (Dilatanzkriterium, Dilatanzprozess),
- die Absenkung wirkender minimaler Gebirgsdrücke im Vergleich zum Druck angreifender äußerer Gebirgswässer des Deck-, Neben- und Liegendgebirges sowie im Vergleich zum ansteigenden Druck fluider Phasen in der untertägigen Entsorgungsanlage und daraus resultierend möglicherweise eine druckinduzierte Infiltration von fluiden Phasen in das abdichtende Barrierengebirge (Fluiddruck- bzw. Infiltrationskriterium, Infiltrationsprozess),
- die Temperaturentwicklung und ihr Einfluss auf die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Temperaturkriterium).

Zu berücksichtigen sind dabei die Mächtigkeiten der geologischen Barriere in der Umgebung der untertägigen Entsorgungsanlage und geotektonische Defekte im Gebirge (Schwachstellenanalyse).

Die zum Nachweis der Integrität der geologischen Barriere heranzuziehenden Kriterien sind standortbezogen zu definieren. Generell erfordert der Langzeitsicherheitsnachweis Aussagen zu folgenden Aspekten:

- Beurteilung der Qualität des anstehenden Gebirges als geologische Barriere (Steinsalzgebirge / Tonsteingebirge, weitere Salinargesteinsformationen / Tongesteinsformationen, Nichtsalinargesteinsformationen / Nichttongesteinsformationen, geologische Defekte),
- Identifizierung von geogen vorhandenen sowie technogen geschaffenen Schwachstellen in der geologischen Barriere,
- Beurteilung der Standsicherheit des Tragsystems und der Barrierenintegrität unter bergbaubedingten Einwirkungen einschließlich der abgelagerten radioaktiven Abfälle,
- Identifizierung von vorhandenen / potentiellen Migrationswegen,
- Beurteilung des langfristigen Verhaltens der radioaktiven Abfälle (z. B. behälterkorrosionsbedingte Gasbildung, geochemische Interaktion mit dem Gebirge, Wärmeentwicklung),
- Abschätzung der Gebirgsdeformationen und der Deformationen an der Tagesoberfläche,
- Beurteilung der verschlossenen Schächte und Strecken unter Langzeitaspekten (z. B. Porosität und Permeabilität, Korrosion etwaig verbliebener Einbauten, Alterung eingesetzter Materialien, mechanischer Verbund / hydraulische Eigenschaften in den Kontaktflächen, aufgelockerte Gebirgskonturbereiche).

Langzeitsimulation für ein Zwei-Sohlen-Bergwerk

Im AP 6.7 des Forschungsprojekts ENTRIA waren ursprünglich Arbeiten zur in situ-Datenerhebung und Demonstration sicherheitsrelevanter Phänomene in der Überwachungsphase eines Tiefenlager- / Endlagersystems vorgesehen. Während der Bearbeitung der Vertikalprojekte 5 und 6 hat sich diesbezüglich allerdings insofern Änderungsbedarf ergeben als in den Vertikalprojekten 5 und 6 für das Tiefenlager- / Endlagersystem mit Möglichkeit zur Überwachung und Rückholbarkeit ein Konzept entwickelt worden ist, das von einer zweisöhligen Konfiguration ausgeht mit der Einlagerungssohle und einer zusätzlichen Überwachungssohle zum längerfristigen unmittelbaren Monitoring auch noch nach Ende des Einlagerungsbetriebes, für eine grundsätzlich erweiterte Konzeption des Endlagerbergwerks aber keine langzeitsicherheitsbezogenen Analysen vorgesehen waren. Gegenstand von AP 6.7mod ist daher nunmehr die

neue, im Rahmen von ENTRIA ergänzend zur Endlagerung mit sofortigem Verschluss untersuchte Alternative einer Endlagerung mit längerfristigem Monitoring.

In den Vertikalprojekten 5 und 6 wurde für das Tiefenlager- / Endlagersystem mit Möglichkeit zur Überwachung und Rückholbarkeit ein Konzept entwickelt, das von einer zweisöhligen Konfiguration ausgeht mit der Einlagerungssohle und einer zusätzlichen Überwachungssohle zum längerfristigen unmittelbaren Monitoring auch noch nach Ende des Einlagerungsbetriebes; für eine grundsätzlich erweiterte Konzeption des Endlagerbergwerks waren aber keine langzeitsicherheitsbezogenen Analysen vorgesehen. Gegenstand von AP 6.7mod ist daher nunmehr die neue, im Rahmen von ENTRIA ergänzend zur Endlagerung mit sofortigem Verschluss untersuchte Alternative einer Endlagerung mit längerfristigem Monitoring.

Dabei wird von folgenden Prämissen ausgegangen:

- Die Überwachungssohle wird auch nach der vollständigen Verfüllung der Einlagerungssohle noch für einen längeren Zeitraum von im Extremfall einigen hundert Jahren offen gehalten.
- Das Monitoring der Einlagerungssohle erfolgt über vertikale Bohrlöcher, die aus der Überwachungssohle direkt in die Einlagerungsstrecken abgeteuft werden, um über diese Bohrlöcher die Installation und gegebenenfalls auch die Wartung von verschiedenartigen Messinstrumenten in der Einlagerungssohle und in ihrem Umgebungsbereich zu ermöglichen.
- Das Abteufen der Monitoringbohrlöcher erfolgt vor der Einlagerung der Abfallbehälter, um diese nicht unbeabsichtigt zu beschädigen. Alternativ bzw. ergänzend könnte die Beobachtung des Endlagerverhaltens auf der Einlagerungssohle über Bohrlöcher bei modifizierter Positionierung der Bohrlöcher auch bis in den Versatzbereich zwischen den Behältern fortgeführt werden, z. B. durch bereits während der Einlagerung installierte Messstationen in versetzten Streckenbereichen.
- Die Bohrlöcher werden derart angelegt, dass eine Reparatur bzw. ein Austausch defekter Messinstrumente möglich ist.
- Die Anordnung eines Stahlausbaus wirkt dem konvergenzbedingten Verschluss der Bohrlöcher im Salinargebirge bzw. dem Verbruch der Bohrlöcher im Tonsteingebirge entgegen.

- Zur Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit sowie zur Reduzierung bzw. Vermeidung der Auswirkungen einer besorgten Direktstrahlung können die Bohrlöcher auch mit einem beweglichen Deckel abgedeckt werden.

Zentrale Arbeitspakete sind

- grundlegende Arbeiten zur numerischen Analyse der erweiterten Konfiguration und Verifikation der Simulationsbefunde,
- die Durchführung vergleichender Analysen zu endlagerrelevanten Nahfeldprozessen im Salinar- und Tonsteingebirge nach Verschluss der Einlagerungssohle und somit ab Beginn der Überwachungsphase im Hinblick auf den Optionenvergleich sowie
- die Visualisierung der fluiddynamischen Prozesse und Ermittlung langzeitsicherheitsrelevanter Zustandsgrößenentwicklungen im Hinblick auf das Monitoring des Anlagenverhaltens (Identifizierung von Anlagenfehlentwicklungen).

Fluiddynamik und Radionuklidmigration

Im Rahmen der Modellierung der Fluiddynamik und der Radionuklidmigration wurden Zweiphasenfluss-gekoppelte Bedingungen (TH2M) berücksichtigt, um Gasbildung und -migration zu erfassen. Mit Hilfe der fluiddynamischen Daten aus den TH2M gekoppelten Simulationsergebnissen von AP 5.2 und 6.7 wurden die Migrationsprozesse der Radionuklide im Tonsteingebirge unter diesen Bedingungen analysiert. Das hierfür verwendete Simulationswerkzeug ist ein modifizierter TOUGH2-EOS9nT Code (Moriadis u. a., 1999). TOUGH2-EOS9nT ist ein numerischer Code für die Simulation des Transports von Radionuklid-Zerfallsketten in den porösen Medien, der jedoch lediglich eine Einphasenströmung voraussetzt. Im Vorhaben wurde eine Schnittstelle zwischen TOUGH2-EOS9nT und den anderen TOUGH2-Modulen entwickelt, damit TOUGH2-EOS9nT die fluiddynamischen Daten aus den mit anderen TOUGH2-Modulen durchgeführten Zweiphasensimulationen für die Transportsimulation übernehmen und somit der Radionuklidtransportprozess unter den oben genannten fluiddynamischen Bedingungen simuliert werden kann. In der numerischen Analyse wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die Geometrie und die Diskretisierung der numerischen Modelle sind identisch zu den „globalen Modellen“, die im Rahmen von AP 5.2 und AP6.7 mit dem TOUGH-FLAC-Simulator (Rutqvist, 2011)

entwickelt worden sind. Somit sind die fluiddynamischen Daten zwischen den Modellen transformierbar.

- Die Rechenfälle für die Beurteilung des langfristigen Verhalten der radioaktiven Abfälle, der verschlossenen Schächte und Strecken von AP 5.2 und AP6.7 (behälterkorrosionsbedingte Gasbildung, unterschiedliche Eigenschaften des Wirtsgesteins usw.) werden bei der Radionuklidmigrationsmodellierung berücksichtigt und analysiert.
- Eine vereinfachte Zerfallskette (^{237}Np , ^{233}U , ^{229}Th) und ein Spaltprodukt (^{36}Cl) werden in der Modellanalyse betrachtet.
- Der advective, diffusive und dispersive Transport der Radionuklide werden in der Modellanalyse berücksichtigt.
- Es wird sehr konservativ angenommen, dass die Freisetzung der Radionuklide aus allen Abfallbehältern gleichzeitig nach dem Verschluss des Endlagers beginnt.
- Die Gasphase wird fluiddynamisch berücksichtigt (s. o.), nicht jedoch der Transport der Radionuklide in der Gasphase.
- Die Löslichkeitsgrenzen für die Radionuklide werden als konstante Randbedingung an den Abfallbehältern vorgegeben. Die Löslichkeitsgrenzen der Radionuklide in der pH-neutralen und salzgesättigten Lösung werden verwendet, da im Szenario aus den Simulationsergebnissen von AP 5.2 und 6.7 angenommen wird, dass das Grundwasser aus dem Deckgebirge in den Endlagerbereich eintreten würde. Die Daten zu den Löslichkeitsgrenzen stammen aus den Simulationsergebnissen des Projektpartners INE-KIT (vgl. Abschnitt 5.4.4).
- Weiterhin wird eine Test-Unsicherheitsanalyse mit dem Transportmodell durchgeführt. Das von IELF entwickelte Software-Werkzeug ReSUS wird für diesen Zweck verwendet.

3.2.9 Entwicklung von Anforderungen für die ENCON-Behälter

Die generischen ENCON-(**ENTRIA CON**tainer)-Behälterkonzepte stellen einen der interdisziplinären Beiträge zu den ENTRIA-Bewertungsgrundlagen dar. Auf den Entstehungsprozess des ENCON wurde bereits im Kapitel Prozessanalyse eingegangen. An dieser Stelle wird die Entwicklung der Anforderungen dargestellt, welche bei der Konzeptionierung der

generischen ENCON-Behälterkonzepte berücksichtigt wurden. Zur Ausarbeitung der Anforderungen an die ENCON-Behälter war es zuerst erforderlich, die Eigenschaften von Behältern zu identifizieren, welche durch die unterschiedlichen Randbedingungen definiert werden. Anschließend wurde die technische Umsetzbarkeit und Gestaltung unterschiedlicher Anforderungen an die Behälter betrachtet. Hierdurch wird es möglich abzuschätzen, welche dieser Forderungen auch bei der Ausarbeitung der generischen ENCON-Konzepte betrachtet werden müssen. In einem ersten Schritt wurden Anforderungen identifiziert, welche internationalen Behälterkonzepten zugrunde liegen. Im Anschluss konnte die Übertragbarkeit der identifizierten Anforderungen auf die generischen Behälterkonzepte untersucht werden. Beispielsweise ist die Forderung nach der dauerhaft unterkritischen Anordnung des Inventars im Behälter so elementar, dass sie allen internationalen Behälterkonzepten zugrunde liegt. Sie gehört somit zu den Anforderungen, die in vollem Umfang auch von generischen Behältern erfüllt werden müssen. Andere Forderungen, wie die nach einer Haltbarkeit des technologischen Barrierensystems über einen Zeitrahmen von über 100.000 Jahren im kristallinen Hartgestein sind wirtsgesteinsspezifisch und somit nur auf die entsprechenden ENCON-Behälter zu übertragen.

Alle internationalen Konzepte enthalten auch technische Anforderungen an die jeweiligen Behälter, die weitestgehend von der Art und Menge des in den Behälter einzulagernden Inventars sowie weiteren individuellen Randbedingungen der Einlagerung beeinflusst werden. Faktoren, die einen großen Einfluss auf die Auslegung von Tiefenlagerbehältern besitzen können, sind unter anderem:

- die Art und Menge der einzulagernden Inventare,
- der Zeitplan, der den Konzepten zugrunde liegt,
- das für die Lagerplanung ausgewählte Wirtsgestein,
- die gewählte Einlagerungsvariante (Streckenlagerung, Bohrlochlagerung,...),
- der geforderte Zeitrahmen einer potentiellen Rückholung / Bergung.

Es wird ersichtlich, dass es im Rahmen der Erarbeitung der Anforderungen an die ENCON-Behälter notwendig war, den Einfluss dieser Variablen zu identifizieren und in Abstimmung mit dem ENTRIA-Bearbeiterteam die Randbedingungen festzulegen, die den Rahmen für das ENCON-Behälterkonzept bilden.

In interdisziplinären Treffen und anschließenden bilateralen Diskussionen wurden die folgenden Randbedingungen festgelegt: Das ENCON-Behälterkonzept berücksichtigt die in Deutschland bis zum Ausstieg aus der kommerziellen Nutzung der Kerntechnik anfallenden Mengen hoch radioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle. Im Rahmen der interdisziplinären Diskussion innerhalb von ENTRIA wurde die Annahme getroffen, dass der Beginn der Einlagerung im Jahr 2075 als wahrscheinliches Szenario angesehen werden kann. In Anlehnung an (Fischer-Appelt u. a., 2013) und (BMUB, 2015a) wird von 30 Jahren Einlagerungsbetrieb ausgegangen, somit ergibt sich eine mittlere Zwischenlagerdauer von etwa 75 Jahren. Alle potentiell geeigneten Tiefenlagerstandorte in Deutschland sollen betrachtet werden, somit sind Behälter für die Wirtsgesteine Salz, Ton / Tonstein sowie für kristallines Wirtsgestein zu entwickeln. Als Einlagerungsvariante wurde die Streckenlagerung in einem einsohligen Lagerbergwerk mit einer zusätzlichen Monitoringsohle gewählt. Bezüglich der Zeitdauer der Rückholbarkeit wurde festgelegt, dass diese gegebenenfalls vom Wirtsgestein abhängig ist. Für die Bergbarkeit gilt die Forderung nach § 1 Abs. 4 S. 2 StandAG, dass diese für 500 Jahre möglich sein soll.

Ausgehend von diesen Randbedingungen konnten Kriterien und Anforderungen für den ENCON zusammengetragen werden. Dies erfolgte unter Berücksichtigung der zuvor identifizierten Beziehungen zwischen Randbedingungen, Anforderungen und Kriterien sowie den Eigenschaften von Lagerbehältern, wie z. B. die Wärmeentwicklung des Inventars und die Kritikalitätsanforderungen. Grundsätzlich stellen Anforderungen die Eingangsparameter der Auslegung des Behälterkonzepts dar. Viele von ihnen stehen jedoch mit anderen Aspekten der Lagerplanung, wie zum Beispiel der Geologie, in einer direkten Wechselwirkung. In diesem Fall war die Entscheidung zu treffen, ob beispielsweise die Geologie die Anforderungen an die technische Barriere definiert oder ob die Anforderungen an die Geologie aus dem umzusetzenden technischen Konzept abgeleitet werden.

In den letzten Jahrzehnten wurden die Geologie und die abgeleiteten geotechnischen Konzepte von Tiefenlagern bereits sehr detailliert beschrieben. Die Endlagerbehälter wurden, im Vergleich hierzu, zumeist nur grob skizziert. Dies ist insofern verständlich, da die Gestaltung der Behälter zwar viele Aspekte des direkten Behälterumfeldes und seiner Handhabung definiert. Allerdings besitzen nur wenige Kenngrößen des Behälters, insbesondere seine Wärmeleistung, einen direkten Einfluss auf die geologische Lagerplanung. Auf Grund dessen wurde auch bei der Definition der Anforderungen für die ENCON-Behälter festgelegt, dass die

Anforderungen an die technische Barriere aus dem geologischen Umfeld abgeleitet werden.

Die identifizierten Anforderungen an Lagerbehälter lassen sich den folgenden Kategorien zuordnen:

- Strukturelle Anforderungen an den Behälter
- Schutz vor ionisierender Strahlung und Überkritikalität
- Verträglichkeit mit dem Lagersystem
- Sonstige Anforderungen aus dem Betriebsablauf

Unter den Oberbegriff „strukturelle Anforderungen an den Behälter“ fallen alle Forderungen welche die Stabilität und Funktionsfähigkeit der Behälter betreffen. Diese können einem zeitlichen Wandel unterliegen. Für den Zeitraum der Bergbarkeit muss ein Austritt von Radionukliden aus dem Behälter vermieden und die Integrität der Behälter gewährleistet werden. Diese Forderung verliert mit zunehmender Wirksamkeit der geologischen Barriere an Bedeutung. Der Erhalt der mechanischen Struktur der Behälter muss jedoch dauerhaft gewährleistet sein, da diese Grundvoraussetzung für den Nachweis der dauerhaft unterkritischen Anordnung der Abfälle erforderlich ist.

Dem Oberbegriff „Schutz vor ionisierender Strahlung und Überkritikalität“ sind Kriterien und Anforderungen zugeordnet, die sich aus dem radiologischen Gefahrenpotential der einzulagernden Reststoffe ergeben. Der Schutz vor ionisierender Strahlung muss nur während der Betriebsphase und im Falle einer Rückholung ausschließlich von den Abfallgebinden gewährleistet werden. Außerhalb der Betriebsphase leisten auch die Geologie des Lagers sowie die geotechnischen Barrieren einen Beitrag zur Abschirmung und Rückhaltung der Radionuklide.

Kriterien und Anforderungen, die von der Wechselwirkung der Behälter mit dem Umfeld beeinflusst werden oder diese Wechselwirkungen selber beeinflussen, fallen unter den Oberbegriff „Verträglichkeit mit dem Lagersystem“. Diese Kriterien besitzen einen direkten Einfluss auf die Behälter- sowie Lagerauslegung und stellen somit elementare Auslegungsgrößen dar. Hierunter fällt z. B. die Forderung nach der Einhaltung wirtsgesteinsspezifischer Temperaturobergrenzen, welche die Behälterkapazität limitieren. Auch die einsetzbaren Materialien für die Behälter sind bei der Tiefenlagerung im großen Maße vom umgebenden Wirtsgestein abhängig und beeinflussen somit die Verträglichkeit der Behälter mit dem Lagersystem.

Kriterien wie die Identifizierbarkeit und Dokumentation der Behälter und des Inventars fallen unter den Punkt „Sonstige Anforderungen aus

dem Betriebsablauf“. Neben solchen, eher organisatorischen, Aspekten werden aber auch die Schnittstellen des Behälters mit den weiteren technischen Komponenten des Lagersystems, wie etwa den Transport- und Handhabungssystemen, unter diesem Oberbegriff definiert.

Auf die detaillierte Ausgestaltung einzelner Kriterien wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

3.2.10 Gestaltung der technischen Barriere in Abhängigkeit vom Wirtsgestein und vom Endlagerkonzept

Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, werden die Randbedingungen der Behälterkonzepte in großem Maße von dem bei der Entwicklung zugrunde gelegtem Wirtsgestein beeinflusst. Somit ist es nicht sinnvoll einen Tiefenlagerbehälter zu entwickeln, welcher in allen Wirtsgesteinen zum Einsatz kommen kann. Als Standort für ein geologisches Tiefenlager kommen in Deutschland auf der Grundlage der derzeitigen rechtlichen Randbedingungen prinzipiell unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen in Frage. Zu betrachten sind Lagerstätten in kristallinem Hartgestein, in Ton / Tonstein sowie in salinaren Formationen. Diese drei Wirtsgesteinstypen unterscheiden sich bezüglich der Randbedingungen der Endlagerung erheblich. Eine weitere Unterteilung, beispielsweise zwischen Ton und Tonstein, ist prinzipiell möglich. Die resultierenden Unterschiede zwischen diesen Unterklassen wären allerdings in Relation zu den Randbedingungen der drei gewählten Typen nur klein. Eine feinere Unterteilung sollte folglich erst zu einem späteren Zeitpunkt des Standortauswahlprozesses erfolgen, wenn bereits auf Daten konkreter Standortregionen zurückgegriffen werden kann.

Der ENTRIA-Optionenvergleich erfordert somit die Entwicklung generischer Tiefenlagerbehälter für die drei oben genannten Wirtsgesteinsoptionen. Der Entwicklung aller Tiefenlagerbehälter lagen folgende Anforderungen und Randbedingungen zugrunde:

- Das Behälterkonzept orientiert sich an dem in Deutschland einzulagernden Mengengerüst hoch radioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle.
- Das Behälterinventar wird aus der thermischen Belastbarkeit des Wirtsgesteins abgeleitet.
- Die Materialien der Behälter orientieren sich an in verschiedenen nationalen Endlagerprogrammen entwickelten Behälterkonzepten für das jeweilige Wirtsgestein, wobei die geometrische Anordnung

des Inventars den Ausschluss selbsterhaltender Kettenreaktionen gewährleisten muss.

- Die Behälter sind zur Gewährleistung der Rückhol- und Bergbarkeit so zu gestalten, dass
 - sie ihre Integrität über den Zeitrahmen von 500 Jahren bewahren,
 - sie über eine ausreichende Abschirmwirkung verfügen,
 - das Inventar auch nach einer Bergung sicher aus dem Behältern entnommen werden kann.

Hieraus folgt, dass die Behälter für die drei unterschiedlichen Wirtsgesteine zunächst vergleichbare, grundlegende technologische Gestaltungsmerkmale aufweisen, um vergleichbare Basiskriterien für eine Optionenanalyse zu erarbeiten. Alle Behälter

- besitzen einen dicht verschweißten inneren Tragbehälter zur Aufnahme des Inventars,
- sind als selbstabschirmende Behälter gestaltet und verfügen über einen coaxialen Aufbau aus:
 - einem stabilen, verschraubten Abschirmbehälter,
 - einer dicht verschweißten Korrosionsbarriere aus einem Material mit hohem Korrosionswiderstand,
 - in den Behälter integrierten Abschirmplatten und -stäben zur Optimierung der Abschirmeigenschaften und zum Erhalt der Kritikalitätssicherheit,
 - in die Behälterstruktur integrierten Tragstrukturen in Form von Mulden oder Ringen.

Aus der Adaption der oben genannten Kriterien auf die drei generischen Wirtsgesteine ergeben sich allerdings auch behälterspezifische technische Details, in denen sich die Behältervarianten erheblich unterscheiden. Diese Unterschiede werden nachfolgend an einigen Beispielen der Behältergestaltung der drei generischen Tiefenlagerbehälter dargestellt.

Der erste technische Aspekt, in dem sich die Randbedingungen der Lagerbehälter für die drei verschiedenen Wirtsgesteine klar voneinander abgrenzen lassen, ist die Wärmeleistung, welche an die Umgebung abgeführt werden kann. Diese wird einerseits durch die Temperaturverträglichkeit der Barrieren und andererseits durch die Wärmeleitfähigkeit und

-kapazität der umgebenden Materialien bestimmt. Schließlich ist zu beachten, dass sich auch für einen eventuellen Rückholungsbetrieb Randbedingungen bzgl. der Wärmeleistung ergeben. Andererseits wird in Endlagerkonzepten auch Kredit von sicherheitstechnisch vorteilhaften Effekten erhöhter Temperaturen (z. B. Verhinderung mikrobieller Aktivität, Beschleunigung von Konvergenz und Versatzkompaktion) genommen. Die zulässige bzw. sinnvolle Wärmeleistung wird in der Regel mittels Auslegungsrechnungen ermittelt, denen eine aus dem Sicherheits- und Endlagerkonzept abgeleitete Grenztemperatur an der Behälteroberfläche zugrunde liegt. Für die ENCON-Entwicklung wurde diese für Steinsalz gemäß (Bollingerfehr u. a., 2012) auf 200°C, für Ton / Tonstein gemäß (ANDRA, 2009) und für kristallines Hartgestein gemäß (SKB, 2011) auf jeweils 100°C festgelegt. Die seit dieser Festlegung durchgeführten Betrachtungen zu höheren Grenztemperaturen einerseits, vgl. etwa (Rübel u. Meleshyn, 2014) wie auch die Festlegungen des Gesetzgebers, vorläufig „...aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius“ auszugehen (StandAG, 2017) andererseits konnten bei der ENCON-Entwicklung nicht berücksichtigt werden.

Ausgehend von den generischen Tiefenlagermodellen des VP6 (Stahlmann u. a., 2015) können die folgenden Wärmeleistungen für die ENCON-Tiefenlagerbehälter abgeleitet werden:

- für den ENCON-S (Steinsalz) 3.000 W,
- für den ENCON-K (kristallines Hartgestein) 1.800 W,
- für den ENCON-T (Ton und Tonstein) 1.000 W.

Aus der Wärmeleistung pro Behälter lässt sich auf der Grundlage des Mengengerüsts der in Deutschland einzulagernden hoch radioaktiven Abfälle und unter Berücksichtigung der Zwischenlagerzeiten das Inventar der einzelnen Behälter abschätzen. Dieses geht nachfolgend als Eingangsgröße in die weitere Behälterauslegung ein. Auf Grund der großen Menge wurden Urandioxid-Brennelemente (BE) aus Druckwasserreaktoren (DWR) mit einem Abbrand von 55 GWd / tSM als repräsentatives Brennstoffinventar für das ENCON-Konzept herangezogen. Zusätzlich werden für alle drei Wirtsgesteinstypen generische ENCON-Behälter für je drei HAW-Kokillen vorgesehen.

Das Inventar der Behälter bestimmt nicht nur die erforderlichen Innenabmessungen, sondern besitzt auch einen direkten Einfluss auf die zur Gewährleistung einer ausreichenden Abschirmung erforderlichen Wandstärken der Behälter. Unter den gegebenen Randbedingungen ergeben sich somit die folgenden Behälterbeladungen:

- Brennstäbe von bis zu 10 DWR-BE (UO₂) für den ENCON-S
- Brennstäbe von bis zu 5 DWR-BE (UO₂) für den ENCON-K
- Brennstäbe von bis zu 3 DWR-BE (UO₂) für den ENCON-T

Als Material für die lasttragenden Strukturen kommt bei allen drei ENCON-Behältervarianten Gusseisen mit Kugelgraphit zum Einsatz, da dieses Material gute mechanische als auch abschirmende Eigenschaften besitzt. Zusätzlich lassen sich Großkomponenten aus diesem Material mit vergleichsweise geringem Aufwand in hoher Fertigungsqualität gießtechnisch fertigen. Allerdings unterscheiden sich die drei ENCON Behälter zur Tiefenlagerung erheblich in der Gestaltung ihrer Korrosionsbarriere.

Literatur

- [ANDRA 2009] Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs: JALON 2009 HA-MAVL - Options de sûreté du stockage en formation géologique profonde. 2009 (C.NT.ASSN.09.0029.B) – Forschungsbericht
- [BMU 2010] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 2010 – Forschungsbericht
- [BMUB 2015a] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm). 2015 – Forschungsbericht
- [BMUB 2015b] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke. 2015 – Forschungsbericht
- [Bollingerfehr u. a. 2012] Bollingerfehr, Wilhelm; Filbert, Wolfgang; Dörr, Sabine; Herold, Philipp; Lerch, Christian; Burgwinkel, Paul; Charlier, Frank; Thomauske, Bruno; Bracke, Guido; Kilger, Robert: *Endlagerauslegung und -optimierung: Bericht zum Arbeitspaket 6 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. Köln: Ges. für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), 2012 (GRS 281)

- [StandAG 2017] Deutscher Bundestag: *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG)*. Juli 2017 – Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- [Driftmann 2016] Driftmann, Christian: *Das Endlagerungskonzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs - eine interdisziplinäre Betrachtung*, Masterarbeit, 2016
- [Endlagerkommission 2016] Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Hrsg.). Deutscher Bundestag: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Verantwortung für die Zukunft: Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes / Deutscher Bundestag. Berlin, 2016 (18/9100) – Bundestagsdrucksache – 684 S.
- [ESK 2013] Entsorgungskommission: Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern / RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz. 2013 – Empfehlung – Revidierte Fassung vom 10.06.2013
- [Filbert 2004] Filbert, Wolfgang: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein: Abschlussbericht / DBE Technology GmbH. A2: Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz und Ton / DBE Technology GmbH. 2004 – Forschungsbericht
- [Fischer-Appelt u. Baltes 2010] Fischer-Appelt, Klaus; Baltes, Bruno: *Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen. Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik. Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“*. Köln: GRS, 2010 (GRS A - 3536)
- [Fischer-Appelt u. a. 2013] Fischer-Appelt, Klaus; Baltes, Bruno; Buhmann, Dieter; Larue, Jürgen; Mönig, Jörg: *Synthesebericht für die VSG: Bericht zum Arbeitspaket 13 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. Köln: GRS, 2013 (GRS 290)
- [Kock u. a. 2012] Kock, Ingo; Eickemeier, Ralf; Frieling, Gerd; Heusermann, Stefan; Knauth, Markus; Minkley, Wolfgang; Navarro, Martin; Nipp, Hans-Konstantin; Vogel, Peter: *Integritätsanalyse der geologischen Barriere: Bericht zum Arbeitspaket 9.1 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. Köln: Ges. für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), 2012 (GRS 286)

- [Kock u. a. 2016] Kock, Ingo; Frieling, Gerd; Navarro, Martin: *Zweiphasenfluss in einem salinaren Endlager am Beispiel des ERAM: Abschlussbericht*. Köln: GRS, 2016 (GRS 444)
- [Lux u. a. 2018] Lux, Karl-Heinz; Düsterloh, Uwe; Wolters, Ralf; Zhao, Juan; Rutenberg, Michael; Feierabend, Jörg; Pan, Tianjie; Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (Hrsg.): *Multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Möglichkeit eines direkten Monitorings - Ein Beitrag zur Verbesserung des geomechanischen und fluiddynamischen Systemverständnisses bei TH2M-gekoppelten Prozessen*. Bd. 23. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger Verlag, 2018
- [Lux u. a. 2017] Lux, Karl-Heinz; Wolters, Ralf; Zhao, Juan; Rutenberg, Michael; Feierabend, Jörg; Pan, Tianjie; Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (Hrsg.): *ENTRIA-Arbeitsbericht 07: TH2M-basierte multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle – Ein Beitrag zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz im Hinblick auf die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen*. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Clausthal-Zellerfeld, 2017 – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Moridis u. a. 1999] Moridis, G. J.; Wu, Y.; Pruess, K.: *EOS9nT: A TOUGH2 module for the simulation of water flow and solute / colloid transport in the subsurface* / Lawrence Berkeley National Laboratory. 1999 (LBNL-42351) – Forschungsbericht
- [Mönig u. a. 2010] Mönig, Jörg; Buhmann, Dieter; Rübel, André; Wolf, Jens; Baltes, Bruno; Peiffer, Frank; Fischer-Appelt, Klaus: *Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes: Bericht zum Arbeitspaket 4 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. Köln: GRS, 2010 (GRS 271)
- [Rutqvist 2011] Rutqvist, Jonny: Status of the TOUGH-FLAC simulator and recent applications related to coupled fluid flow and crustal deformations. In: *Computers & Geosciences* 37 (2011), Juni, Nr. 6, S. 739–750

- [Röhlig u. a. 2016] Röhlig, Klaus-Jürgen; Hocke, Peter; Smeddinck, Ulrich; Walther, Clemens; Eckhardt, Anne; Hassel, Thomas; Chaudry, Saleem; Plischke, Elmar: Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen. 2016 – Zwischenbericht des Verbundvorhabens ENTRIA 2013 – 2015: Ergebnisse, Arbeitsstand und Leistungsbilanz
- [Rübel u. Meleshyn 2014] Rübel, André; Meleshyn, Artur: *Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein – Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie*. Köln: Ges. für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), 2014 (GRS 338)
- [SKB 2011] Svensk Kärnbränslehantering AB: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. 2011 (TR-11-01) – Forschungsbericht – Volumes I – III
- [Stahlmann u. a. 2015] Stahlmann, Joachim; Mintzlaff, Volker; Léon Vargas, Rocio P.; Institut für Grundbau und Bodenmechanik (Hrsg.): Generische Tiefenmodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung. Braunschweig, 2015 (3) – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Weiss u. a. 2013] Weiss, Wolfgang; Larsson, Carl-Magnus; McKenney, Christopher; Minon, Jean-Paul; Mobbs, Shelly; Schneider, Thierry; Umeki, Hiroyuki; Hilden, Wolfgang; Pescatore, Claudio; Vesterlind, Magnus: ICRP Publication 122: Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste. In: *Annals of the ICRP* 42 (2013), Juni, Nr. 3, S. 1–57
- [Zhao 2017] Zhao, Juan: *Multiphysikalische Prozess- und Systemanalyse für geologische Tiefenlager im Tonsteingebirge in der Nachverschlussphase*. Clausthal-Zellerfeld, Dissertation, 2017

3.3 Ausgewählte interdisziplinäre Beiträge zu naturwissenschaftlich-technischen Fragestellungen

3.3.1 Reduzierung ausgewählter Robustheitsdefizite bei der Bewertung des Endlagersystemverhaltens

Eine Bewertung der drei in den ENTRIA-Vertikalprojekten untersuchten Entsorgungsoptionen könnte nach (Kreusch u. Neumann, 2015) u. a. auf der standort- bzw. referenzmodellbezogenen Identifizierung von sicherheitstechnischen Anforderungen beruhen. Diese werden seit einigen Jahren international in so genannten Sicherheitsfunktionen (safety functions) systematisiert und operationalisiert werden. Dies geschah z. B. im Rahmen des Forschungsprojekts VerSi – Durchführung vergleichender Langzeitsicherheitsanalysen für verschiedene geologische Situationen zur Evaluierung der Methodik und Instrumentarien, (Fischer-Appelt u. Baltes, 2010).

Im Forschungsprojekt VerSi ist ein Verfahren zur vergleichenden Bewertung von Standorten für die Endlagerung Wärme entwickelnder (hoch radioaktiver und langlebiger mittel radioaktiver) Abfälle auf sicherheitsanalytischer Basis entwickelt worden. Das in VerSi entwickelte Verfahren basiert im Wesentlichen zunächst auf der Ableitung von Sicherheitsfunktionen sowie dann nachfolgend auf der Bewertung ihrer Relevanz und Robustheit anhand von Abwägungskriterien. Unter Relevanz ist dabei zu verstehen die in jedem Fall gegebene Bedeutung einer Sicherheitsfunktion für den langfristigen Einschluss der eingelagerten Abfälle und insbesondere der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Robustheit meint die Zuverlässigkeit und Qualität und somit die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen.

Wesentliche Aspekte bei der Bewertung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen sind einerseits die Ermittlung der eine Sicherheitsfunktion charakterisierenden materiellen Eigenschaften im Ist-Zustand, andererseits aber auch die Ermittlung der Prognostizierbarkeit dieser Eigenschaften in ihrem zeitlichen Verlauf bis zum Ende des Betrachtungszeitraums, der heutigen Anforderungen entsprechend 1 Million Jahre umfasst (StandAG, 2017). Im Rahmen der Gesamtbewertung von Endlagersystemen sind dabei insbesondere auch Wechselwirkungen zwischen verschiede-

nen Sicherheitsfunktionen innerhalb eines Endlagersystems zu analysieren.

Die Ermittlung der das jeweilige Endlagersystem charakterisierenden materiellen Eigenschaften im gegenwärtigen Zustand beruht auf hinreichend qualifizierten Untersuchungsmethoden (laborativ sowie in-situ), während zur hinreichend zuverlässigen Ermittlung der Prognostizierbarkeit dieser Eigenschaften in eine längerfristige Zukunft eine stetige Verbesserung des Prozess- und Systemverständnisses sowie damit einhergehend bzw. darauf aufbauend auch die stetige Verbesserung des Simulationsinstrumentariums (Stoffmodelle und Simulatoren) anzustreben ist. Dabei sind insbesondere diejenigen Prozesse von Bedeutung, die im Lauf der Zeit zu einer Verschlechterung der materiellen Eigenschaften insbesondere der verschiedenartigen Barrieren führen können, z. B. die auffahrungs- und offenhaltungsbedingte Entfestigung des konturnahen Gebirges, die druckgetriebene Fluidinfiltration sowie die lösungsbedingte Korrosion von Abdichtungsmaterialien.

Diesen zentralen Aspekten der Robustheitsanforderungen entsprechend sind in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1 und VP 5.2 sowohl laborative Untersuchungen zur Analyse ausgewählter Materialeigenschaften wie auch retrospektive Analysen ausgewählter Labor- und Feldversuche zur Verifizierung und Validierung des Simulationsinstrumentariums sowie zur Verbesserung des Prozessverständnisses anhand von so genannten Lokal- bzw. Prozessmodellen durchgeführt worden. Zusätzlich wird durch rechnerische Simulationen anhand von großräumigen so genannten Global- bzw. Systemmodellen eine Verbesserung des Verständnisses des langfristigen Endlagersystemverhaltens angestrebt, insbesondere im Hinblick auf die im Endlagersystem ablaufenden fluiddynamischen Prozesse, die letztendlich der Träger der Mensch und Umwelt gefährdenden Radionuklidmigration aus den Einlagerungsbereichen des Endlagerbergwerks über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und das Fernfeld in die oberflächennahen Grundwasserhorizonte und dann weiter in die Biosphäre sind.

Vor diesem Hintergrund der Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen auf der Basis des Konzepts von Sicherheitsfunktionen liegt der Fokus der in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1, VP 5.2 und VP 6.7mod durchgeführten Arbeiten schwerpunktmäßig auf der Verbesserung der Robustheit der in Fischer-Appelt u. Baltes (2010) angegebenen radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktion „Begrenzung / Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“. Dabei stehen im Vordergrund der durchgeführten Arbeiten die Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge in ih-

rer Funktion als geologische Barriere wie auch die jeweilig eingesetzten Versatzmaterialien Salzgrus und Bentonit, die in mehrfacher Funktion einerseits zur langzeitigen Stabilisierung der bergbaulichen Hohlräume, andererseits zum Erhalt der Integrität der geologischen Barriere sowie als geotechnische Barrieren zur Behinderung der Fluidmigrationen herangezogen werden.

3.3.2 Abschirmungseigenschaften verschiedener Betone

Motivation. Bei Stahlbetonbauteilen zur Abschirmung ionisierender Strahlung gab es in der Vergangenheit einige Fälle, in denen nach der baulichen Umsetzung festgestellt wurde, dass die tatsächliche Abschirmwirkung schlechter war, als auf Basis theoretischer Rechnungen zu erwarten gewesen wäre. Auch wird in manchen Berichten hinsichtlich Abschirmungsuntersuchungen über Diskrepanzen zwischen Literaturwerten und Messergebnissen berichtet.

Beton ist ein heterogen zusammengesetzter Baustoff, dessen Eigenschaften durch eine geeignete Komposition der Einzelkomponenten individuell an spezielle Anforderungen (z.B. Strahlenschutz) angepasst werden können. Im Rahmen von ENTRIA wurden daher in einem ersten Ansatz verschiedene Betone in Bezug auf strahlenabschirmende, mechanische und dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften untersucht. Insbesondere im Kontext von Lager- bzw. Entsorgungsanlagen für hoch radioaktive Reststoffe werden hohe Anforderungen an diese drei Eigenschaften gestellt. Auf Grundlage der Analyse der untersuchten Kompositionen und der vorgestellten Untersuchungsmethoden selbst könnten in einem nachfolgenden Schritt weitere, optimierte Kompositionen entwickelt werden, die besonders gut für die sensiblen Anforderungen in kerntechnischen Lagerungsbauwerken geeignet sind.

Experimente. Am iBMB wurden verschiedene Betonproben aus Normalbeton (N-Beton), Hämatitbeton (H-Beton) und Barytbeton (B-Beton) hergestellt. Dazu wurden Balken mit einer Breite und Höhe von etwa 8 cm hergestellt, die anschließend mit einer Steinsäge in 15 mm dicke Platten geschnitten wurden. Bei der Herstellung wurden in einigen Betonproben bewusst Fehlstellen herbeigeführt, die mit dem Kürzel F, wie z.B. in NF-Beton, versehen wurden. Zur Bestimmung der Druckfestigkeit wurden zusätzliche Prüfkörper (Würfel mit einer Kantenlänge von 15 cm) aus den verschiedenen Mischungen hergestellt. Zudem wurde ein im Betonwerk hergestellter, mikroverstärkter und selbstverdichtender Hochleistungsbeton (DUCON) in die Untersuchungen einbezogen.

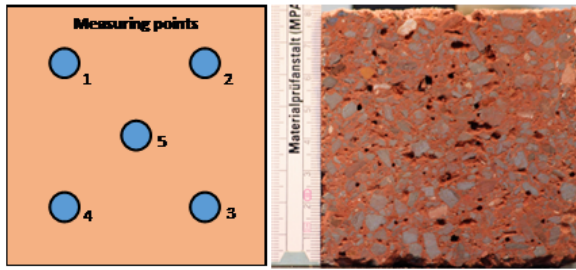


Abbildung 3.9: Frontansicht der Betonplatten mit der Position der verschiedenen Messpunkte.

Unabhängig von der jeweiligen Zuschlagstoffart wurde jede Betonmischung so ausgelegt, dass vergleichbare Volumenmengen an Wasser, Zement und Gesteinskörnung erreicht werden. Der Zielvolumenanteil des hydratisierten Zements einschließlich Poren betrug 30 % und der Anteil der Gesteinskörnung 70 % des gesamten Volumens. Die maximale Korngröße betrug sowohl bei der Gesteinskörnung des Normalbetons als auch beim Barytbeton 16 mm, während beim Hämatitzuschlag ein kleinerer Durchmesser von 5,6 mm gewählt wurde. Die experimentell bestimmte Sieblinie (Korngrößenverteilung) zeigte eine gute Übereinstimmung mit den in DIN EN 206 (2017) hinterlegten Sieblinien. Künstliche Fehlstellen in den „F-Betonen“ wurden durch Stochern mit kleinen Stäben in den frisch gegossenen Beton realisiert. Da die „F-Betone“ danach nicht mehr verdichtet wurden, blieben Defekte im Festbeton zurück.

Im Kontrollbereich des KIT-INE wurde die Betonplatten einer gerichteten Gammastrahlung ausgesetzt. Die Transmissionsmessungen wurden zunächst mit je einer und anschließend mit drei Betonplatten durchgeführt. Mittels eines Bleikollimators (Loch mit 8 mm Durchmesser in einem Bleiziegel von 48 mm Dicke) wurde die Photonenstrahlung einer Cs-137-Quelle kollimiert auf die Betonplatten gerichtet. Die Transmission der monoenergetischen Strahlung ($E_\gamma = 662 \text{ keV}$) wurde gammaspektroskopisch durch einen High-Purity-Germanium-Detektors bestimmt. Dabei wurden jeweils fünf Messpunkte auf den verschiedenen Betonplatten aus N, NF, H, HF, B und BF-Beton (Breite und Höhe ca. 8 cm; Dicke je 15 mm) ausgemessen. Die auf den Betonplatten gekennzeichneten Messpunkte sind in Abbildung 3.9 dargestellt. Die Messpunkte 1 bis 4 befinden sich jeweils 2 cm von den Rändern entfernt, Punkt 5 ist in der Mitte der Platte angeordnet. Zur Ermittlung der genauen Lage der lokalen Fehlstel-

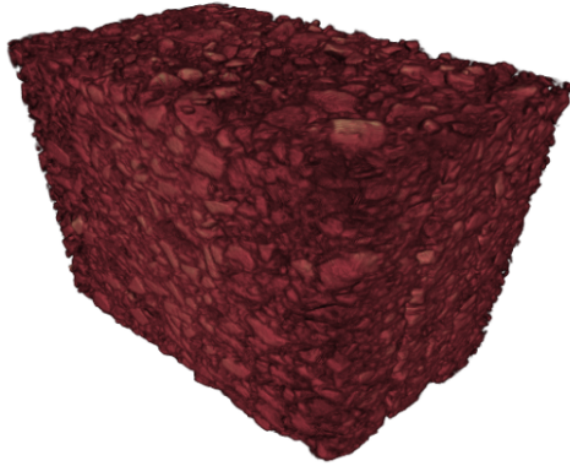


Abbildung 3.10: Dreidimensionale Projektion der μ CT-Daten für Hämatitbeton (Probe H4-6).

len wurden die Proben am iMBB unter Verwendung eines (Kegelstrahl-) Mikrocomputertomographen (μ CT) mit einer Spannung von 200 kV bei 350 μ A und einem Fokus-Objekt-Abstand von etwa 420 mm gescannt. Die Voxelkantenlänge⁷ in den rekonstruierten Bilddaten beträgt etwa 103 μ m. Jeder Scan wurde mit drei Platten durchgeführt, um die Gesamtdauer der Messungen zu reduzieren. Um die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, wurden alle Betontypen mit den gleichen Einstellungen gescannt und rekonstruiert. In Abbildung 3.10 ist die dreidimensionale Visualisierung der Bilddaten eines Scans mit Hämatitbeton dargestellt. Für den Vergleich der inneren Struktur der verschiedenen Betone mit den experimentellen Transmissionsmessungen wurden an den Positionen der Messpunkte fünf „Regions of Interest“ (ROI) in Bezug auf die Größe des Kollimators extrahiert. Diese wurden zunächst visuell auf leicht sichtbare Auffälligkeiten hin untersucht und anschließend mit bildverarbeitenden Methoden in die verschiedenen Komponenten segmentiert.

Die Messergebnisse der Bestrahlungsexperimente wurden mit numerischen Geant4-Simulationen (Geant4, 2017) verglichen. Hierzu wurden weitere Transmissionsexperimente durchgeführt, um Transmissionskurven zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurden Betonplatten aus dem glei-

⁷Voxel: Dreidimensionales Volumenelement in einem Raster. Begriffsbildung ist analog zum zweidimensionalen Pixel – picture element.

chen Material aneinandergereiht und mit dem gleichen Messaufbau wie zuvor gemessen. Für die Geant4-Simulationen wurde ein geeignetes Modell des Messaufbaus, bestehend aus Gammastrahlungsquelle, entsprechenden Betonplatten und Germaniumdetektor, erstellt. Die chemisch-mineralogische Materialzusammensetzung und die Dichte der Betonproben wurden anhand von Literaturdaten und ergänzenden Messungen ermittelt. In der Literatur werden für Gesteine immer Dichtebereiche angegeben (Bundesamt für Strahlenschutz, 2002), weil die Zusammensetzung einer aufgrund der Entstehung natürlichen Streuung unterliegt. Da die Dichte aber einer der maßgebenden Parameter zur Beurteilung der Abschirmwirkung ist, wurden die Dichten der Gesteine und der Betone experimentell mittels Unterwasserwägung bestimmt. Die durch die Monte-Carlo-Simulationen erzeugten Gammaskpektren wurden auf die gleiche Weise wie die gemessenen Spektren ausgewertet.

Ergebnisse. Abbildung 3.11 zeigt die resultierenden positionsabhängigen Transmissionswerte für drei Betonplatten der Zusammensetzung N, NF, H und HF. Die Messergebnisse zeigen zunächst, dass Proben mit Fehlstellen in der Regel keine höhere Abweichung vom Mittelwert aufweisen. Es konnten aber bei allen Proben starke Schwankungen in Abhängigkeit vom Messpunkt identifiziert werden. Diese Variationen sind größer als die Messfehler. Sie können durch Analyse der ROI der μ CT-Scans für die verschiedenen Messpunkte der Betonproben erklärt werden. In Abbildung 3.12 sind einige Histogramme der rekonstruierten Bilddaten dargestellt. Aus diesen Daten ist es zwar nicht möglich, einen Abschwächungskoeffizienten zu berechnen, aber die Histogramme geben einen Anhaltspunkt dafür. Je niedriger der Grauwert ist, desto geringer ist die Dichte des Materials. Folglich befinden sich Lufthohlräume und Fehlstellen auf der linken Seite der Histogramme, während sich die festen Phasen auf der rechten Seite befinden. Durch die Segmentierung des Histogramms in zwei Teile unter Verwendung eines einfachen Schwellwertverfahrens (Otsu, 1979) können halbquantitative Werte für die Porosität (Defekte und Luftporen) berechnet werden. In Abbildung 3.13 sind die Ergebnisse einer solchen Segmentierung dargestellt. Bei der Ermittlung der ROI an den Punkten 1 und 2 des Hämatitbetons mit Fehlstellen (HF) ist festzustellen, dass die Makroporosität am Punkt 1 viel höher ist als am Punkt 2, was qualitativ auch auf einem aus den dreidimensionalen Bilddatensätzen entnommenen Schnittbild und dem entsprechenden segmentierten und binarisierten Schnittbild in Abbildung 3.14 sichtbar ist. Die schwarzen Bereiche auf den Bildern repräsentieren die Luftporen, die weißen Bereiche sind den verschiedenen Feststoffen zuzuordnen.

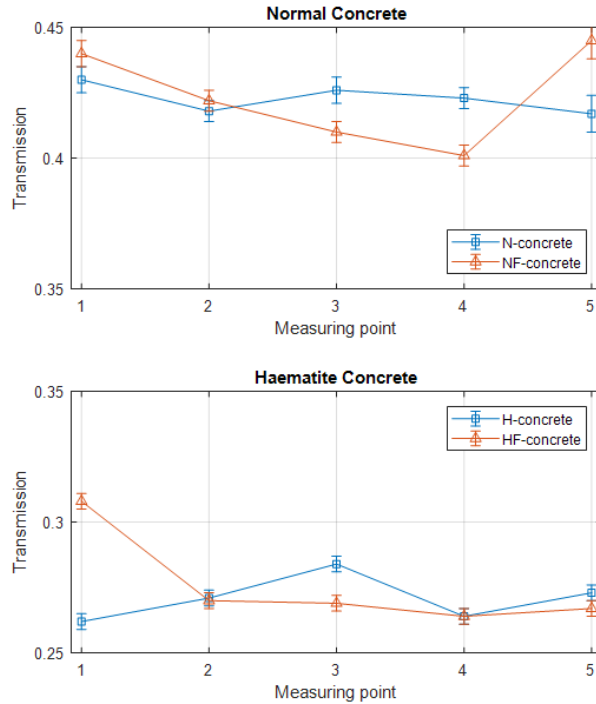


Abbildung 3.11: Ergebnisse für Transmissionsmessungen an den verschiedenen Messstellen mit und ohne Fehlstellen für die verschiedenen Betonzusammensetzungen.

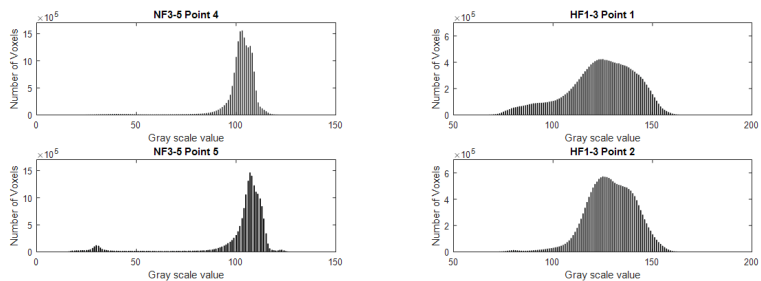


Abbildung 3.12: Histogramme der ROI an den Messpunkten 4 und 5 für NF (links) und an den Messpunkten 1 und 2 für HF (rechts).

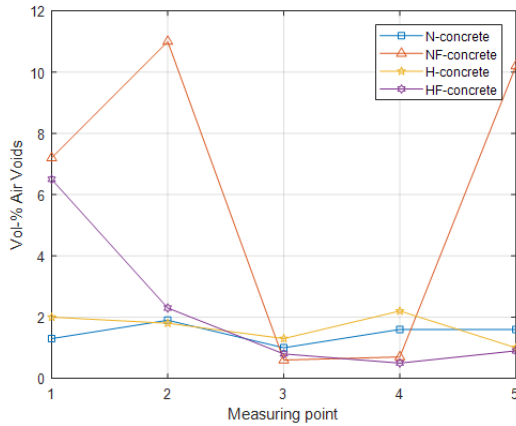


Abbildung 3.13: Segmentierungsergebnisse für die Luftporen aus den μ CT-Scans für N, NF, H und HF.

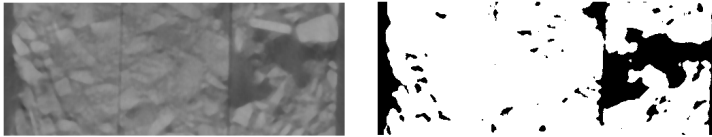


Abbildung 3.14: Graustufenbild (links) und binäres Bild (rechts) von HF an Punkt 1.

Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass die Porosität nicht das einzige Kriterium für die Bewertung der Abschirmeigenschaften der verschiedenen Betone ist. Speziell für Schwerbeton ist es auch wichtig, die Zuschlagstoffe zu segmentieren. Die Zuschlagstoffe im Normalbeton haben typischerweise ähnliche Abschwächungskoeffizienten wie der Zementstein und können daher in erster Näherung als ein Material behandelt werden. Schwerbeton hingegen muss in mindestens drei Teile segmentiert werden, da die Menge an Zuschlagstoffen die Abschwächungskoeffizienten stärker beeinflusst als der Anteil der Makroporen. Um die Zuschlagstoffe aus Graustufenbildern zu segmentieren, müssen umfangreichere Bildverarbeitungsschritte durchgeführt werden. Diese wurden mit MATLAB® unter Verwendung des 3-d-Boxfilters, der Histogrammequalization (Kontrastverstärkung) und der Multithresh-Methode (mehrstufiges Schwell-

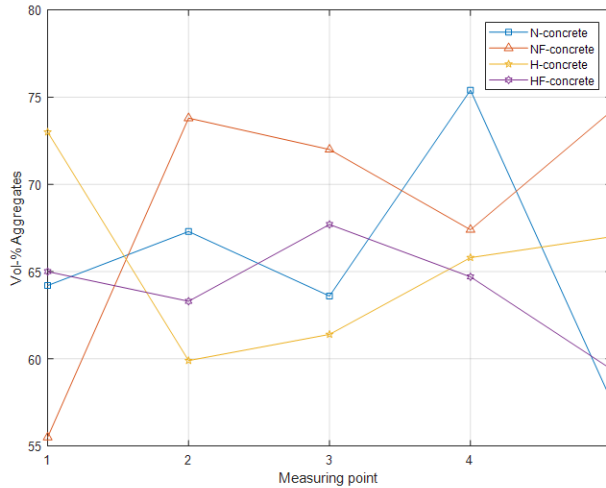


Abbildung 3.15: Segmentierungsergebnisse für die Gesteinskörnung aus den μ CT-Scans für N, NF, H und HF.

wertverfahren) realisiert. In Abbildung 3.15 sind die Ergebnisse nach der Durchführung dieser Schritte dargestellt.

Abbildung 3.16 zeigt einen Vergleich der experimentellen Transmissionsdaten mit berechneten Daten, die aus der Analyse der Grauwertspektren abgeleitet wurden. Hier wurde in einer ersten Näherung angenommen, dass der Abschwächungskoeffizient proportional zu einer linearen Kombination der Intensität ist, die durch die verschiedenen Bereiche in den Grauwertspektren erhalten wird. Die Ergebnisse dieses einfachen Ansatzes zeigen bereits Analogien bezüglich des Kurvenverlaufs.

Um Geant4-Simulationen mit experimentellen Daten zu vergleichen, wurden darüber hinaus Transmissionskurven gemessen und simuliert. Abbildung 3.17 zeigt repräsentative Ergebnisse der Transmissionskurven für Hämatitbeton mit einer Aneinanderreihung von bis zu 10 Platten. Die Geant4-Simulationen basieren auf einem Modell des Messaufbaus, einschließlich der Materialzusammensetzungen des Betons und der gemessenen Dichten. Die Simulationsdaten stimmen mit den experimentellen Daten recht gut überein.

Zusammenfassung. Die Anwendung von μ CT-Scans unterstützt die Untersuchungen, indem ein erster Anhaltspunkt auf die Abschirmeigen-

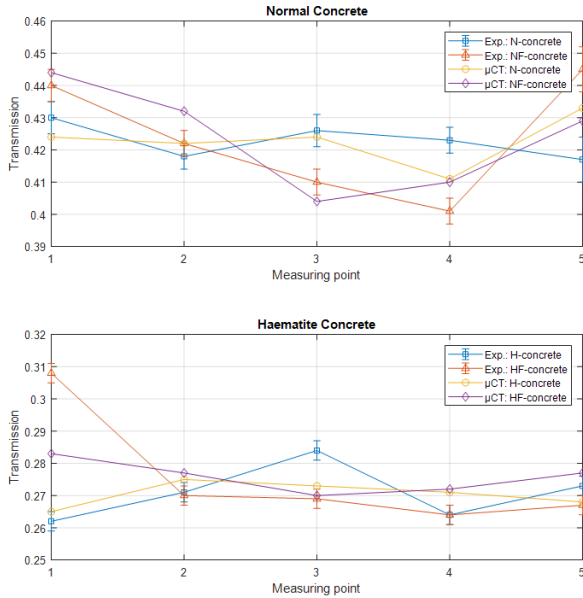


Abbildung 3.16: Vergleich experimenteller Transmissionsdaten mit den berechneten Daten aus den Ergebnissen der μ CT-Scans.

schaften und die Verteilung der verschiedenen Komponenten gegeben wird. Die gute Übereinstimmung zwischen den Geant4-Simulationen und den Messungen zeigt, dass entsprechende Monte-Carlo-Berechnungen mit hinreichender Genauigkeit durchgeführt werden können. Eine genaue Spezifikation der Betonzusammensetzung ist jedoch sehr wichtig, da Literatur oder Datenbanken im Allgemeinen nur einen Bereich für die benötigten Werte angeben. Darüber hinaus geben strukturelle Details, wie sie im μ CT oder anhand anderer Durchstrahlungsprüfungen beobachtet werden können, einen weiteren Aufschluss über das spezifische Materialverhalten. Abweichungen vom erwarteten Verhalten in Experimenten können so erklärt werden. Im Besonderen könnten sich die vorgestellten Methoden aber auch dazu eignen, Baustoffe hinsichtlich spezifischer Anforderungen weiterentwickeln und zu optimieren. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Baustofftechnologen und Strahlenschutzern resultiert in einem tieferen Verständnis des Einflusses der Betonzusammensetzung auf die Abschirmeigenschaften für Gammastrahlung. In der

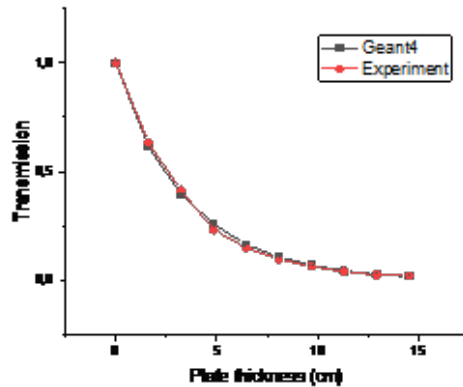


Abbildung 3.17: Vergleich der Transmissionskurven der Messungen (Experiment) mit den Geant4-Simulationen für H-Beton.

Praxis setzt dies das Verständnis der jeweils anderen Disziplin und damit verbundener Aufgaben voraus, kann aber insbesondere im Entwurfsprozess zu effektiven Ergebnissen führen.

3.3.3 Kritische Evaluation der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum § 47 der Strahlenschutzverordnung

Das Arbeitspaket 2.3 ist im Transversalprojekt „Technikfolgenabschätzung und Governance“ angesiedelt. Es befasst sich mit der interdisziplinären Thematik „Radioökologische Instrumente als fachliche Unterstützung zur regulatorischen Entscheidungsfindung“. International wird diese Thematik seit Jahren auf diversen Konferenzen diskutiert, allerdings kann sie keiner einzelnen Disziplin zugewiesen werden, da sowohl Radioökologen aus dem naturwissenschaftlichen Bereich als auch Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen, die als ‚policy advisor‘ in Behörden oder internationalen Organisationen wie der IAEA oder der OECD/NEA arbeiten, am Diskurs beteiligt sind.

Die Schutzziele des Strahlenschutzes werden in der Regel über die Einhaltung bestimmter Dosiswerte, d. h. Werte für die Höhe der Exposition ionisierender Strahlung, definiert. Überall dort, wo diese Dosis / Exposition nicht direkt gemessen werden kann, müssen Expositionsabschätzun-

gen vorgenommen werden. In dem Fall, in dem radioaktives Material aus Anlagen in die Umwelt freigesetzt wird, erfordert die Expositionsabschätzung nicht nur Angaben, die das radioaktive Material direkt betreffen und Angaben zu Aufnahmezeiten und Expositionszeiten der betroffenen Personen, sondern auch Informationen zu den Transferpfaden der Radionuklide durch die jeweils betroffenen Umweltkompartimente wie Luft, Wasser (Ozeane, Oberflächengewässer, Grundwasser), Boden und geologischem Untergrund. Somit spielt der ökologische Transfer der Radionuklide eine zentrale Rolle bei der Gefährdungsabschätzung und die Instrumente zur belastbaren Prognostizierung des Transfers sind von erheblicher Bedeutung für die regulatorische Entscheidungsfindung.

In diesem Arbeitspaket wurde die Thematik aus zwei Perspektiven untersucht. An dieser Stelle wird insbesondere die interdisziplinäre Perspektive, die sich mit dem Übergang des naturwissenschaftlich abgeleiteten Modells hin zum regulatorischen Instrument befasst, vorgestellt. Die zweite Perspektive, die sich mit (rein) naturwissenschaftlichen Fragen der radioökologischen Expositionsmodellierung befasst – den Transferprozessen von ¹²⁹Iod im Boden – wird in der Einzelvorstellung des Arbeitspakets beschrieben.

Die Untersuchungen zur Rolle der radioökologischen Expositionsmodellierung im Entsorgungsprozess zielen darauf ab, ein verbessertes Verständnis über die Einflüsse und Anforderungen an Instrumente des Strahlenschutzes zu gewinnen. Dies gilt beispielsweise für die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (AVV) (BMU, 2012). Besonders zu untersuchen ist dabei der Übergang vom wissenschaftlichen Modell zum untergesetzlichen Regelwerk, und eine zentrale Frage ist dabei, welche gesellschaftlichen Einflüsse und Anforderungen an die Expositionsabschätzung im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle vorliegen. Dieser Übergang wird geprägt durch eine Vielzahl von Prozessen, aber auch durch gerichtliche Auseinandersetzungen. Zu diesen Prozessen mit ihren Beratungen und eingehenden Stellungnahmen von Experten-Gremien gehören sowohl Vorschläge aus Behörden wie auch Anfragen von Behörden an Gutachter. Daran beteiligt sind u. a. die Strahlenschutzkommission des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (SSK), Gutachter wie Brenk Systemplanung, Bundesministerien wie das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Bundesämter oder halbstaatliche Institutionen wie die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS).

Als Untersuchungsmethode wurden Leitfadenterviews gewählt. Es wurden sechs leitfadengestützte Interviews und drei informelle Infor-

mationsgespräche mit Experten aus relevanten Behörden und Gremien geführt (SSK, BFS, GRS, Fachverband für Strahlenschutz, BMUB). Die Leitfadeninterviews wurden aufgezeichnet, transkribiert und in Anlehnung an die qualitative Inhaltsanalyse nach (Gläser u. Laudel, 2009) ausgewertet.

Als Ergebnis konnten mehrere Spannungsfelder im Hinblick auf die Rolle der radioökologischen Expositionsmodellierung im Entsorgungsprozess identifiziert werden. Dies sind die drei Spannungsfelder a) konservative verglichen mit realistischer Abschätzung, b) Risikokommunikation und c) Weiterentwicklung von radioökologischen Expositionsabschätzungsverfahren. Diese werden im Folgenden beschrieben.

Problematik der konservativen im Vergleich zur realistischen Abschätzung.

Von allen Experten wurde das Problem der konservativen gegenüber der realistischen Abschätzung der Exposition beschrieben. Konservative Annahmen, wie beispielsweise besonders (unrealistisch) hohe Annahmen zur Nahrungsmittelaufnahme, oder auch besonders ungünstige Transfergeschwindigkeiten in einem Umweltkompartiment, werden in Expositionsmodellierungen gewählt, die zur Entscheidungsgrundlage für die behördliche Genehmigung kerntechnischer Anlagen herangezogen werden, wie beispielweise die AVV. Die Rechtssicherheit der administrativen Entscheidung soll durch eine Betrachtung, in der ungünstige Expositions-Szenarien abgebildet sind, hergestellt werden. Solche Genehmigungen gelten allerdings für im Endlagerungskontext kurze Zeiträume, also für Jahrzehnte, und die prognostizierte, modellierte Exposition wird während des Betriebes begleitend überwacht. Die Spanne zwischen der „gegenwärtigen Zukunft“, die prognostiziert wird, und der „zukünftigen Gegenwart“, in der die Prognose überprüft werden kann, liegt innerhalb des menschlichen Zeithorizontes. Dies gilt nicht mehr für die Prognosen zu Endlagerungsszenarien und macht sie somit nicht validierbar. Die Ungewissheiten, die für die Grundannahmen der ökologischen Rahmenbedingungen und des menschlichen Verhaltens innerhalb geologischer Zeiträume auftreten, lassen sich durch konservative Annahmen nicht umschiffen, die erwünschte Rechtssicherheit der behördlichen Entscheidung lässt sich auf diesem Wege nicht erreichen. Schwieriger noch, die konservativen Annahmen suggerieren schlimmstenfalls eine Kenntnis der Zukunft, die fragwürdig erscheinen muss. Es ist offensichtlich, dass das bewährte Instrument der Expositionsabschätzung im Strahlenschutz hinsichtlich seiner Effektivität bei der Endlagerungsplanung an seine Grenzen stößt. Daher ist die einhellige Expertenmeinung, dass Dosis bzw. Expositionswerte kein Entscheidungskriterium sein können, sondern ma-

ximal Indikatoren darstellen, anhand derer unterschiedliche potentielle Standorte miteinander verglichen werden können (BMU, 2010; DAEF, 2017). Obwohl logisch begründet, mag der Verzicht auf Dosisangaben als Entscheidungskriterium dennoch in der uninformierten Öffentlichkeit als ein Verzicht auf Strahlenschutz, beziehungsweise als verminderte Anforderungen des Strahlenschutzes an die Endlagerung erscheinen. Dieser Problematik muss entgegengesehen werden, es bedarf konstruktiver Lösungen. Die Autorin hält partizipatorische Verfahren in diesem Bereich für überlegenswert.

Problematik der Risikokommunikation zur Expositionsmodellierung. Ein weiteres Spannungsfeld stellt die Kommunikation der Sicherheitsbetrachtungen dar. Einige der Experten weisen darauf hin, dass es in der Öffentlichkeit einen hohen Bedarf an Informationen hinsichtlich der Expositionsmodellierung gibt. Zum einen erfolgt die Einschätzung, dass eine sogenannte „vereinfachte radiologische Langzeitaussage“ von der Öffentlichkeit als nicht ausreichende Darstellung angenommen werden wird. Des Weiteren wurde darauf hingewiesen, dass die Modellierung der Radionuklidmigration durch die Biosphäre (mittels Referenzbiosphären (International Atomic Energy Agency, 2003)) zwar keinen großen Einfluss auf die Sicherheitsüberlegungen und -maßnahmen für ein Endlager hat, aber notwendig im Hinblick auf die Risikokommunikation ist. Die Art und Weise, wie die Prozesse an der Erdoberfläche berechnet werden – Prozesse, zu denen viele Menschen eine Vorstellung besitzen – würden stellvertretend für die Qualität des gesamten Abschätzungsverfahrens einstehen müssen, für ein Verfahren also, das Bereiche umfasst, für die keine Überprüfung am eigenen Wissen stattfinden kann. Auf diese Form der „peripheren Informationsverarbeitung“ weisen bereits Ergebnisse der sozialpsychologischen Forschung aus den 1980er Jahren (Petty u. Cacioppo, 1986) und finden Beachtung in der Risikokommunikation (Wiedemann u. a., 2009). In eine ähnliche Richtung deuten auch die Forderungen der Experten, dass die Berechnungen der Exposition vom Quellterm bis zur Referenzperson offengelegt werden sollen, um gewisse Parameter-Entscheidungen nachvollziehen zu können. Ebenso wurde auf die Notwendigkeit hingewiesen, auch die potentielle Exposition für Kinder dezidiert auszuweisen, da diese Personengruppe von der Öffentlichkeit als besonders gefährdet wahrgenommen wird.

Problematik der Weiterentwicklung von radioökologischen Expositionsabschätzungsverfahren während laufender behördlicher Genehmigungsverfahren. Die Notwendigkeit der Rechtssicherheit für behördliche Entschei-

Radioökologische Expositionsmodellierung				
Akteure	Ziele	Radionuklide in der Umwelt	Transport durch die Umwelt	Dosis
Wissenschaft	Erklärung	bekannt oder beobachtet	?(erforscht)	bekannt oder beobachtet ?(erforscht)
Politikberatung	Prognose	bekannt oder geplant	bekannt	?(prognostiziert)
	Regulation	? (erlaubt)	bekannt	bekannt oder toleriert

Abbildung 3.18: Unterschiedliche Zielstellungen der Expositionsmodellierung, modifiziert nach (Mosbach-Schulz, 2013).

dungen, die durch den Verweis auf das radioökologische Expositionsabschätzungsmodell gegeben werden soll, hat wiederum Implikationen auf die wissenschaftliche Weiterentwicklung dieser Expositionsmodelle. Ein Experte wies darauf hin, dass während des Genehmigungsverfahrens für das Endlager für schwach und mittel radioaktive Abfälle „Schacht Konrad“, das von 1982 bis 2002 stattfand und schließlich von 2002 bis 2007 noch einmal vor Gericht verhandelt wurde, die wissenschaftliche Diskussion zur Weiterentwicklung der radioökologischen Expositionsmodellierung zurückgehalten wurde. Damit wurde auf einen intrinsischen, nahezu antagonistischen Widerspruch der jeweiligen Zielstellungen der Expositionsmodellierung in den Bereich Administration und Wissenschaft hingewiesen. Abbildung 3.18 visualisiert die unterschiedlichen Zielstellungen der radioökologischen Expositionsmodellierung und die daraus folgenden unterschiedlichen Ansprüche. Während im wissenschaftlichen Bereich selten ein abschließender Erkenntnisstand postuliert wird, sondern ein verfeinertes Verständnis der beobachteten Umweltprozesse angestrebt wird, hier der Transport der Radionuklide durch die Umweltkompartimente, bedürfen Behörden, die Entscheidungen treffen müssen, der Entscheidungsgrundlagen, die so stabil sind, dass sie Rechtssicherheit gewähren. Sowohl für Prognosen über das Gefährdungspotential von Radionukliden in der Umwelt als auch für Genehmigungsentscheidungen muss von einem Expositionsmodell ausgegangen werden, das für den Prognose- bzw. Genehmigungszeitraum Gültigkeit hat.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Expositionsmodellierung eine schwierige Stellung in der Regulierung und im Management der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle einnimmt:

Obgleich die Sicherheitsaussagen im Strahlenschutz größtenteils auf Dosisaussagen rekurren, können solche Aussagen im Hinblick auf die

Endlagerungszeiträume und -szenarien nur unter großen Ungewissheiten gegeben werden, die nur eine geringe prognostische Güte zulassen. Wie kann dennoch die „strahlenschützerische Sicherheit“ demonstriert werden, ohne zugleich eine neue Größe zu definieren (wobei die Gefahr bestünde, dass sie als Konstruktion aufgefasst wird, mit der Kerntechnik-Experten „ihr eigenes Süppchen kochen“)? Kann der Safety Case dieses Dilemma ausgleichen?

Wie wird dem Interesse der Öffentlichkeit an Dosisaussagen Rechnung getragen? Inwieweit müssen Abschätzungsverfahren, in denen hochkonservative Annahmen eingesetzt werden, solchen mit realistischen Annahmen gegenüber gestellt werden, um das Ausmaß der konservativen Annahmen (beispielweise bei der Parameterwahl, der Szenarienwahl oder der Wahl der Referenzbiosphäre) zu erklären?

Und nicht zuletzt, wie kann in einem Verfahren, in dem Genehmigungen ausgesprochen werden müssen, gleichzeitig der radioökologische Erkenntniszugewinn implementiert werden?

3.3.4 Endlager unter geänderten Klimabedingungen

Der Nachweis einer langzeitsicheren, nachsorgefreien Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle beruht auf der Integrität von technischen und geologischen Barrieren. Wegen der zeitlichen Perspektive des Gesamtvorhabens Langzeitsicherheit von ca. 1 Mio. Jahre ist es sinnvoll, die Folgen möglicher Klimaänderungen bezüglich der geologischen Barriere zu betrachten. Hierbei hilft der Blick in die jüngste geologische Vergangenheit, also in das Holozän bis ca. 12.000 BP (BP: before present) und das jüngere und mittlere Pleistozän bis ca. 780.000 BP. Für diese Zeitspanne sind Zeugnisse der zeitlichen Änderungen der globalen Temperatur, des Meeresspiegels und der Eisverbreitung auf der Nordhalbkugel erhalten.

Mit Ausnahme der anthropogenen Einflüsse der jüngsten Vergangenheit ist der Wechsel von Warm- und Kaltzeiten auf natürliche Ursachen zurückzuführen. Dieser Wechsel ist rhythmisch und bildet ein gemeinsames Auf und Ab von CO₂-Gehalt der Atmosphäre, globaler Temperatur, Meeresspiegeländerungen vor dem Hintergrund der Exzentrizität und Obliquität von Erdachse und Erdbahn ab (siehe Abb. 3.19). Allerdings sind die Maxima der Exzentrizität zeitlich etwas versetzt gegenüber den Maxima von Meeresspiegelschwankungen, Temperatur und CO₂-Gehalt. Obwohl diese Beobachtungen allgemein als gesichert anerkannt werden,

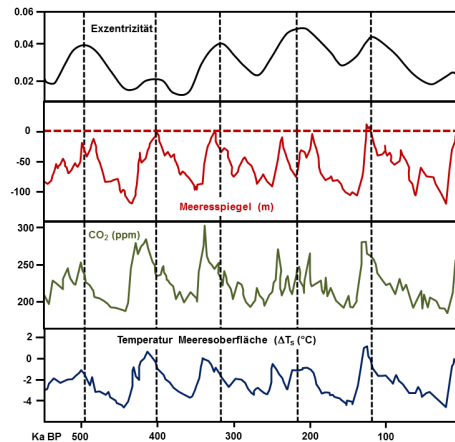


Abbildung 3.19: Rhythmischer Wechsel von Treibhausgaskonzentration (hier CO₂), durchschnittliche Meerestemperatur (Oberflächenwasser) und Höhe des Meeresspiegels sowie Exzentrizität der vergangenen 500.000 Jahre zusammengestellt und neu geordnet nach Daten aus (Quinn u. a., 1991) und (Hansen u. a., 2013).

gibt es keine einfache Erklärung dieses klimatischen Rhythmus.⁸ Säkulare Änderungen von Erdbahn und Erdachse (Milankovic-Zyklen) können einen Teil der Phänomene erklären. Der Grund für die Korrelation von CO₂-Konzentrationsänderungen der letzten 500.000 a mit astronomischen Parametern (siehe Abb. 3.19) wird gegenwärtig noch nicht umfassend verstanden.

Bezieht man die aktuell beobachtete Freisetzung anthropogener Treibhausgase (vor allem CO₂) ein, können sich grundsätzlich zwei Szenarien ergeben, die von den natürlichen Zyklen abweichen:

⁸Klimawandel und die Folgen des Klimawandels gehören zu den am intensivsten diskutierten politischen Themen. Die Auseinandersetzungen erfolgen nicht immer auf der Basis gut aufbereiteter Datensätze. Um Kritiken an der Verwendung bestimmter Daten bzw. der Nicht-Berücksichtigung anderer Daten und deren Interpretationen zu vermeiden, wurde hier auf drei unwidersprochene Publikationen zurückgegriffen (Quinn u. a., 1991; Gregoire u. a., 2012; Hansen u. a., 2013). Einige Daten und Extrapolationen entstammen den Angaben des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), das von der World Meteorological Organization (WMO) und des Umweltprogrammes der Vereinten Nationen (UNEP) unterstützt wird (<http://www.ipcc.ch/report/ar5>).

1. Weitgehende Kompensation der Erderwärmung durch astronomische Faktoren und Einkopplung in den bisherigen Rhythmus natürlicher Klimaänderungen, oder
2. Übersteuerung der Folgen des anthropogenen CO₂-Ausstoßes auf die globale Temperatur ohne wirksame Kompensation durch natürliche Faktoren. Bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Integrität der geologischen Barriere lassen sich für diese Szenarien folgende Voraussagen treffen.

Zu 1). Bei weitgehender Kompensation der Auswirkungen der anthropogenen CO₂-Freisetzung stellt sich der Wechsel moderater Warm- und Kaltzeiten so ein, wie er für die vergangenen 500.000 a bis 1 Ma zu beobachten ist. Ein Blick in Abb. 3.19 zeigt, dass der Meeresspiegel nur kurzfristig und um wenige Meter über das gegenwärtige Niveau hinaus ansteigen würde. Anders sind dagegen die Auswirkungen der Kaltzeiten einzuordnen: Neuerliche Eisvorschübe bis 50° nördlicher Breite mit Eismächtigkeiten von einigen Kilometern können die oberen 500 Meter des jetzigen Deckgebirges in Norddeutschland gründlich verändern. Dieses beinhaltet unter anderem den flächenhaften Abtransport von Lockermassen und die Freilegung von Gesteinsschichten bis zu 500 m Tiefe einschließlich der oberen Bereiche permischer Salzformationen. Die Besorgnis um die Integrität der obersten 500 m Deckgebirge beruht auf dem Nachweis entsprechend tief reichender glazigener Rinnen und noch tiefer reichender kryogener Klüftung von Salzkörpern, wie sie in Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern zu beobachten ist. Da nicht auszuschließen ist, dass eine neuerliche Vereisung zu noch tiefer reichenden Massebewegungen führen kann, sollten mindestens 1.000 m Tiefe für den Top des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches gewählt werden. Die Einbeziehung glaziologischer Forschungskompetenz wäre hilfreich für eine solche Entscheidung.

Zu 2). Für den Fall eines nicht-modierten Anstieges der globalen Temperatur und des Meeresspiegels ist mit einer Abschmelzung der polaren Eismasse zu rechnen. Der daraus resultierende Anstieg des Meeresspiegels kann 60 bis 80 m betragen. Die bisher beobachteten Anstiegsraten des Meeresspiegels liegen zwischen 6 mm/a für den Beginn der letzten Warmzeit vor ca. 12.000 a und 10 mm/a für den Übergang von Kalt- zu Warmzeit vor 350.000 a bis 340.000 a. Ein linearer Anstieg des Meeresspiegels bei vollständigem Abtauen der Eiskappen um 60 m würde bei den genannten Raten 6.000 bis 10.000 a dauern. Ein nicht-linearer Anstieg des Meeresspiegels wird für das Ende der letzten Eiszeit verzeichnet: Hier erfolgte ein Anstieg um 20 m innerhalb von 400 bis 500 Jahren

(Gregoire u. a., 2012). Als Ursachen werden massive Schmelzwasser-Zutritte durch ein kollabierendes Eisschild in der Antarktis oder im Bereich des kanadisch-grönländischen Sockels diskutiert. Ein nicht-lineares drastisches Ereignis dieses Ausmaßes ist auch gegenwärtig nicht auszuschließen. Darüber hinausgehende Erhöhungen des Meeresspiegels erfordern Änderungen in der globalen Verteilung von Kontinentalmasse; diese verlaufen aber mit etwa 5 cm/a und sind daher nur für sehr große Zeiträume $\gg 1$ Ma relevant.

Die episodische Überflutung randlicher Kontinentallagen durch Meerwasser ist für die vergangenen 60 Ma (Tertiär und Quartär) regelmäßig zu verzeichnen. Zu dieser Zeit waren die halokinetischen Masseumlagerungen der norddeutschen Salzstöcke bereits weitgehend abgeklungen. Die Überdeckung der mehrere 100 m tief lagernden Salzformationen mit Sedimenten und Sedimentgesteinen hat einen chemischen Austausch von Evaporiten und Meerwasser verhindert und die geologische Integrität der Salzformationen nicht berührt.

Insgesamt wären daher die Auswirkungen kommender Kaltzeiten auf die Sicherheit der geologischen Barriere eines Tiefenlagers für wärmentwickelnde radioaktive Abfälle besonders zu berücksichtigen. Meeresspiegelanstiege in der genannten Größenordnung werfen Fragen für eine eventuelle Rückholbarkeit wie auch für langfristiges Monitoring auf, sind aber ansonsten eher unschädlich für die langzeitliche Integrität der geologischen Barriere.

Literatur

- [BMU 2010] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmentwickelnder radioaktiver Abfälle. 2010 – Forschungsbericht
- [BMU 2012] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus Anlagen oder Einrichtungen. 2012 (zu § 47 Strahlenschutzverordnung) – Allgemeine Verwaltungsvorschrift
- [Bundesamt für Strahlenschutz 2002] Bundesamt für Strahlenschutz (Hrsg.): *Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte*. Köln, 2002

- [DAEF 2017] Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung: Standortauswahl für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle: Empfehlungen der DAEF zu Rolle und Methodik der im Standortauswahlgesetz vorgesehenen Sicherheitsuntersuchungen. 2017 – Forschungsbericht
- [StandAG 2017] Deutscher Bundestag: *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG)*. Juli 2017 – Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- [DIN EN 206 2017] Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016. In: *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016* (2017), Nr. DIN EN 206:2017-01
- [Fischer-Appelt u. Baltes 2010] Fischer-Appelt, Klaus; Baltes, Bruno: *Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen. Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik. Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“*. Köln: GRS, 2010 (GRS A - 3536)
- [Geant4 2017] Geant4: Geant4 - a Toolkit for the Simulation of the Passage of Particles through Matter. In: *Geant4 - a Toolkit for the Simulation of the Passage of Particles through Matter* (2017)
- [Gläser u. Laudel 2009] Gläser, Jochen; Laudel, Grit: *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrument rekonstruierender Untersuchungen*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009
- [Gregoire u. a. 2012] Gregoire, Lauren J.; Payne, Antony J.; Valdes, Paul J.: Deglacial Rapid Sea Level Rises Caused by Ice-Sheet Saddle Collapses. In: *Nature* 487 (2012), Juli, Nr. 7406, S. 219–222
- [Hansen u. a. 2013] Hansen, James; Sato, Makiko; Russell, Gary; Kharecha, Pushker: Climate Sensitivity, Sea Level and Atmospheric Carbon Dioxide. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 371 (2013), September, Nr. 2001, S. 20120294–20120294
- [International Atomic Energy Agency 2003] International Atomic Energy Agency: *“Reference biospheres” for solid radioactive waste disposal*. Wien: International Atomic Energy Agency, 2003

- [Kreusch u. Neumann 2015] Kreusch, Jürgen; Neumann, Wolfgang: Vergleichende Bewertung von Referenzoptionen mit Hilfe von Sicherheitsfunktionen, Systemrobustheiten, Robustheitsdefiziten sowie der Risiken menschlichen Handelns. 2015 – Interner Bericht
- [Mosbach-Schulz 2013] Mosbach-Schulz, Olaf: Wissenschaftliche Risikobewertung – wie unsicher ist sicher? In: *LÜKEX 2013, Wissenschaftliche Unsicherheit und Krisenkommunikation in außergewöhnlichen biologischen Bedrohungslagen, Tagungsband des 3. Themenworkshops, Herausforderungen für Behörden im Bereich Gesundheit, gesundheitlicher Verbraucherschutz und Sicherheit, 18. und 19. Juni 2013. Bad Breisig*, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2013, S. 38–47
- [Otsu 1979] Otsu, Nobuyuki: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* SMC-9 (1979), Januar, Nr. 1, S. 62–66
- [Petty u. Cacioppo 1986] Petty, Richard E.; Cacioppo, John T.: The Elaboration Likelihood Model of Persuasion. In: *Advances in Experimental Social Psychology* Bd. 19. Elsevier, 1986, S. 123–205
- [Quinn u. a. 1991] Quinn, Thomas R.; Tremaine, Scott; Duncan, Martin: A Three Million Year Integration of the Earth's Orbit. In: *The Astronomical Journal* 101 (1991), Juni, Nr. 6, S. 2287–2304
- [Wiedemann u. a. 2009] Wiedemann, Peter; Löchtefeld, Stefan; Claus, Frank; Markstahler, Stephanie; Peters, Ibo: Laiengerechte Kommunikation wissenschaftlicher Unsicherheiten im Bereich EMF / Bundesamt für Strahlenschutz. 2009 (StSch 3608S03016) – Abschlussbericht

3.4 Risiko und Sicherheit

Ein wichtiges Ziel, das mit der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle verfolgt wird, ist, Menschen und Umwelt vor schädigenden Einwirkungen der Abfälle zu schützen. Risiko und Sicherheit sind daher Querschnittsthemen, die die meisten der bei ENTRIA durchgeführten Forschungsarbeiten begleiten. Die Ausgestaltung der Entsorgungsoptionen soll dazu beitragen, die mit der Entsorgung verbundenen Risiken auf ein akzeptables Maß⁹ zu begrenzen. Risiken waren deshalb bei allen Vertikalprojekten im Rahmen von ENTRIA von Bedeutung. Dies gilt für die Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ebenso wie für das monitoringbasierte Sicherheits- und Life-Cycle-Konzept für das Oberflächenlager, für die geotechnische Bewertung der Einlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit ebenso wie für die Bewertung von Technologien zur Handhabung der Lagerbehälter.

Im gesellschaftlichen Diskurs zur Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle nehmen Risiken eine zentrale und wiederkehrende Rolle ein. Risiko und Sicherheit wurden daher auch in den Transversalprojekten Technikfolgenabschätzung und Governance sowie ethisch-moralische Begründung, rechtliche Voraussetzungen und Implikationen thematisiert. Aufgrund der Vernetzung und der interdisziplinären Zusammenarbeit bei ENTRIA wurden etliche Fragen, die Risiken betreffen, letztlich von Vertretern verschiedener Vertikal- und Transversalprojekte gemeinsam bearbeitet. Dazu gehören unter anderem die Sicherheitskonzepte der Referenzmodelle (vgl. Kapitel 3.2.2) für die Entsorgungsoptionen bei ENTRIA.

3.4.1 Transversalprojekt Interdisziplinäre Risikoforschung

Die spezifisch auf Risiko und Sicherheit ausgerichteten Arbeitspakete bei ENTRIA waren im Transversalprojekt „Interdisziplinäre Risikoforschung“ angesiedelt. Mit dem Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal, dem Institut für Radioökologie und Strahlenschutz der LU Hannover, dem Institut für Nukleare Entsorgung beim KIT in Karlsruhe und einer Arbeitsgemeinschaft unter der Leitung der risicare GmbH, Zürich, waren vier der zwölf an ENTRIA beteiligten Institutionen in diesem Transversalprojekt vertreten.

Innerhalb des Transversalprojekts wurde das Thema Risiko unter unterschiedlichen Gesichtspunkten beleuchtet:

⁹ Welches Maß an Risiken akzeptabel ist, geben bei der Umsetzung von Entsorgungsoptionen rechtliche Regelungen vor.

Die Beschäftigten in Entsorgungseinrichtungen sind radiologischen Belastungen ausgesetzt. Je nach Entsorgungsoption sind unterschiedliche radiologische Belastungen zu erwarten. Daher wurden bei ENTRIA Forschungsarbeiten zu den individuellen Strahlenexpositionen von Beschäftigten bei Arbeitsabläufen in Entsorgungsanlagen für hoch radioaktive Abfälle durchgeführt. Insbesondere wurde auch vergleichend untersucht, welche Strahlenexposition mit der Rückholung von Abfallbinden einhergeht.

Für die Langzeitsicherheit von Tiefenlagern ist relevant, wie und in welchem Ausmaß sich Radionuklide in die Umwelt bewegen. Zur Ermittlung der Radionuklidmobilisierung wurden deshalb Quellterme am Ort der Einlagerung abgeschätzt. Sind Radionuklide aus einem Tiefen- oder Oberflächenlager in die Umwelt gelangt, muss zur Bestimmung der radiologischen Gefährdung deren Eintrag in die Nahrungskette berücksichtigt werden. Bei ENTRIA wurden daher auch Forschungsarbeiten durchgeführt, um die Einflüsse besser zu verstehen, die zur Aufnahme von Radionukliden in Pflanzen beitragen.

Mit einer Softwareplattform, die im Rahmen von ENTRIA entwickelt wurde, können sicherheitsrelevante Prozessen in Tiefenlagern numerisch modelliert werden. Damit wird die vergleichende Bewertung der Langzeitsicherheit von Tiefenlagern im Hinblick auf den Schutz vor ionisierender Strahlung sowie radio- und chemotoxischen Stoffen unterstützt. In die Plattform flossen neu entwickelte theoretische Grundlagen zu probabilistischen Analysen ein. Die Plattform bietet die Möglichkeit, weitere Modelle anzukoppeln.

Zudem wurde im Transversalprojekt „Interdisziplinäre Risikoforschung“ eine systematische vergleichende Risikobewertung der bei ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen vorgenommen. Die Bewertung wurde nach kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten differenziert vorgenommen. In die Bewertung gingen neben technisch-naturwissenschaftlichen und sozialwissenschaftlichen Erkenntnissen auch ethische Überlegungen ein.

Im Transversalprojekt „Interdisziplinäre Risikoforschung“ fanden sich sowohl Arbeitspakete, die darauf abzielten, mit empirischen Untersuchungen neue spezifische Erkenntnisse hervorzubringen als auch solche, die vor allem auf der bestehenden Fachliteratur sowie – im Sinn eines transdisziplinären Ansatzes – auf Erfahrungen mit politischen Prozessen, der Aufsichtspraxis von Behörden etc. beruhten.

Zwischen den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen, die an den Transversalprojekten beteiligt waren, fand ein interdisziplinärer Austausch im Rahmen der Projekt- und Bearbeitertreffen bei ENTRIA statt. Dazu traten mehrere Treffen, die spezifisch dem Thema Risiko gewidmet waren,

und zwei Transversalprojekt-Treffen (siehe Seite 36), bei denen ebenfalls Risiko und Sicherheit im Mittelpunkt des Austauschs standen.

3.4.2 Vergleichende Risikobewertung

Das Team des Arbeitspakets „Interdisziplinäre Risikoforschung“ im Transversalprojekt „Interdisziplinäre Risikoforschung“ hatte sich eine vergleichende Bewertung der Risiken, die sich mit den bei ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen verbinden, zum Ziel gesetzt. Dieses Ziel wurde über die gesamte Laufzeit von ENTRIA hinweg verfolgt. Die Ergebnisse der vergleichenden Risikobewertung sollten in eine Form gebracht werden, die für Entscheidungsträger, insbesondere auch Politikerinnen und Politiker, und Vertreter der interessierten Öffentlichkeit zugänglich und aussagekräftig ist. Angesichts der Vielfalt der Risikobegriffe, Risikowahrnehmungen und Risikoansichten rund um die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle wurde sehr bald deutlich, dass dabei komplexere Sachverhalte dargestellt werden mussten. So entstand die Idee einer „Risikokarte“ (vgl. Anhang).

Die Risiken einer Entsorgungsoption lassen sich in verschiedene Typen differenzieren. Von besonderer Relevanz für die Bewertung sind die kalkulierbaren Risiken und die Ungewissheiten. Zudem verändern sich die Risiken im Lauf der Zeit. Im öffentlichen und wissenschaftlichen Diskurs stehen bisher, insbesondere bei Tiefenlageroptionen, Überlegungen zur Langzeitsicherheit im Vordergrund. Risiken, die die kommenden Jahre und Jahrzehnte betreffen, werden im Vergleich dazu eher vernachlässigt. Die Risikokarte sollte daher die Entwicklung der Risiken über den gesamten Zeitraum wiedergeben, über den ein Entsorgungspfad beschritten wird. Damit wird das Ziel verfolgt, Entscheidungsträgern und allen weiteren Interessierten ein differenziertes Bild von der Entwicklung der Risiken über die Zeit zu vermitteln. Die Risikokarte soll die Betrachtenden in die Lage versetzen, die Entwicklungen der Risiken über die Zeit für verschiedene Entsorgungsoptionen gegeneinander abzuwägen.

Die internationale Erfahrung zeigt, dass auch dann, wenn bereits ein Entsorgungspfad beschritten wurde, Diskussionen über die „richtige“ Entsorgungsoption wiederkehrend sind. Bei ENTRIA wurden sowohl die Endlagerung und die Oberflächenlagerung als auch die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit untersucht. Bei letzterer verbinden sich sowohl Vor- als auch Nachteile der Endlagerung und der Oberflächenlagerung. Vorteile der End- und der Oberflächenlagerung sind: Die Endlagerung gewährt auf lange Zeit passive Sicherheit und entlastet kommende Generationen davon, Ressourcen in die Entsorgung

der hoch radioaktiven Abfälle investieren zu müssen. Die Oberflächenlagerung erlaubt es, die Abfälle aktiv unter Kontrolle zu halten und lässt kommenden Generationen die Freiheit, die Entsorgung so zu gestalten, wie es ihren Vorstellungen entspricht. Daher kann mit guten Gründen sowohl für die eine als auch für die andere Option votiert werden. Die Risikokarte und die ihr zugrundeliegenden Untersuchungen erlauben es, Vor- und Nachteile verschiedener Entsorgungsoptionen in Bezug auf die Risiken für Menschen nach verschiedenen Risikotypen differenziert und im zeitlichen Verlauf zu betrachten. Sie sollen daher ein Instrument darstellen, auf das auch bei künftigen Diskussionen um die „richtige“ Entsorgungsoption zurückgegriffen werden kann, um die Risiken, die sich mit verschiedenen Entsorgungsoptionen verbinden, gegeneinander abzuwägen.

Um die Risikokarte darstellen und die ihr zugrundeliegenden Untersuchungen vornehmen zu können, war es erforderlich, die Entsorgungspfade, die sich mit den drei Entsorgungsoptionen Endlagerung, Einlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit und Oberflächenlagerung verbinden, eingehender zu beschreiben. Eine zentrale Grundlage dafür bildete der Austausch zwischen verschiedenen Arbeitspaketen bei ENTRIA zur Ausgestaltung und zum Sicherheitskonzept der Referenzmodelle (vgl. Kapitel 3.2.2). Die vergleichende Risikobewertung und damit auch die Risikokarte stützen sich auf die Referenzmodelle. Darüber hinausgehend wurden weitere wesentliche Elemente des Entsorgungspfades in die vergleichende Risikobewertung aufgenommen, die unmittelbar sicherheitsrelevant sind. Darunter fallen vor allem Zwischenlagerung und Transporte. Die Entwicklung der drei Referenzoptionen wurde, um eine gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten, in charakteristische Phasen unterteilt, die bei allen Entsorgungsoptionen ähnliche Zeitspannen beanspruchen. Beispiele dafür sind die Phase des Standortauswahlverfahrens oder die Bau- und die Einlagerungsphase der Entsorgungsanlagen. Bei der Beschreibung der Phasen wurde davon ausgegangen, dass die Entwicklung der Entsorgungsoption weitgehend so erfolgt, wie sie heute geplant ist. Es wurden aber auch alternative Entwicklungspfade erwogen, insbesondere die Rückholung oder Bergung der Abfälle.

Bei der Durchführung der vergleichenden Risikobewertung wurden die Beschreibungen der Entsorgungspfade zur Endlagerung, zur Einlagerung mit Vorkehrungen für Monitoring und Rückholbarkeit und zur Oberflächenlagerung von einer Mitarbeiterin bei ENTRIA entwickelt, die über viel Erfahrung bei der behördlichen Sicherheitsaufsicht verfügt. Ihre Arbeiten wurden von zwei Kollegen im Team korreferiert und ergänzt, die über ein breites Wissen und langjährige Erfahrung mit der Zwischenlage-

rung hoch radioaktiver Abfälle bzw. mit der Lagerung in Bergwerken in tiefen geologischen Formationen verfügen. Für die Beschreibung wurden nicht nur die Referenzmodelle herangezogen, sondern es wurden auch Dokumente konsultiert, die in anderen Kontexten bei ENTRIA entstanden waren, und teilweise direkte Gespräche mit Vertretern anderer Arbeitspakete bei ENTRIA geführt. So etablierte sich beispielsweise eine gute Zusammenarbeit zwischen dem Vertikalprojekt Oberflächenlagerung und dem Experten, der im Arbeitspaket „Interdisziplinäre Risikoforschung“ vor allem die Sicherheit von Zwischenlagern vertrat.

3.4.3 Bewertungsansätze

Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Abfälle gehen mit einem breiten Spektrum an Risiken einher. Dazu zählen radiologische Risiken für beruflich exponierte und nicht beruflich exponierte Personen und die Umwelt ebenso wie Risiken für Personen und Sachwerte, die mit dem Bau der Entsorgungsanlagen in Verbindung stehen, oder Risiken für Personen aufgrund hoher psychosozialer Belastungen, die beispielsweise im Zusammenhang mit umstrittenen Genehmigungsverfahren auftreten können.

Die vergleichende Risikobewertung bei ENTRIA zielte auf eine umfassende Betrachtung der Risiken für Personen ab. Dabei wurde zunächst nach kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten differenziert. Das Konzept des Risikos wird zum rationalen Umgang mit ungewissen Entwicklungen in der Zukunft verwendet. Ein Risiko besteht, wenn ein Schaden mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten oder nicht eintreten kann. Ein Risiko wird als kalkulierbar bezeichnet, wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Ausmaß eines Schadens abgeschätzt werden können. Als Ungewissheit wird ein Mangel an Information zur Ausgangslage oder zu künftigen Entwicklungen bezeichnet, der die Einschätzung eines Risikos erschwert. Ungewissheiten betreffen beispielsweise Parameter und Prozesse, die eine Entsorgungsoption aus technisch-naturwissenschaftlicher Perspektive charakterisieren. Sie betreffen aber auch zukünftige Veränderungen der politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, die Akzeptanz des Vorhabens durch wichtige Akteure und mögliche neue wissenschaftliche Erkenntnisse und technische Entwicklungen während der Planung und Umsetzung eines Vorhabens (Eckhardt u. Rippe, 2016). Die Grundlagen für diesen Bewertungsansatz wurden vor allem in Zusammenarbeit zwischen Naturwissenschaftlern und Philosophen bei ENTRIA festgelegt. In die Ausgestaltung der Bewertung gingen jedoch auch Erkenntnisse aus den Sozialwissenschaften ein, beispielsweise aus der Organisationspsychologie. Hier soll vor allem

der Beitrag von Prof. O. Sträter, Universität Kassel, erwähnt werden, der dem Team des Arbeitspakets „Interdisziplinäre Risikoforschung“ wichtige fachliche Impulse gab.

Wenn über die Risiken von Entsorgungsoptionen gesprochen wird, stehen im öffentlichen Diskurs häufig die radiologischen Risiken im Vordergrund. Radiologische Risiken werden von vielen Personen als besonders bedrohlich wahrgenommen. Diese Risiken weisen verschiedene Merkmale auf, aufgrund derer sie ungünstig bewertet werden. Zu diesen Merkmalen zählt, dass Radioaktivität mit den menschlichen Sinnen nicht direkt wahrnehmbar ist. Schwere gesundheitliche Schäden, die durch Radioaktivität verursacht werden, sind nicht reversibel, was sich ebenfalls auf die Bewertung des Risikos auswirkt. Viele Menschen sehen kaum Möglichkeiten, radiologische Risiken selbst zu kontrollieren und empfinden zudem die Freiwilligkeit, mit der das Risiko eingegangen wird, als gering. In die vergleichende Risikobewertung bei ENTRIA ging daher auch eine spezifische Bewertung der radiologischen Risiken der betrachteten Entsorgungsoptionen ein. Dieser Bewertungsansatz ist primär naturwissenschaftlich ausgerichtet.

Unempfindlichkeit gegenüber inneren und äußeren Einflüssen wird als Robustheit bezeichnet. Die Robustheit einer Entsorgungsoption gibt Auskunft über Stärken und Schwächen einer Entsorgungsoption in Bezug auf Risiken und Ungewissheiten. Im Rahmen der vergleichenden Risikobewertung wurde daher auch eine Bewertung nach Sicherheitsfunktionen und Robustheit vorgenommen. Diese vergleichende Bewertung knüpft an Erkenntnisse aus dem Projekt „Vergleichende Sicherheitsanalysen“ (VerSi) der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (Fischer-Appelt u. Baltes, 2010) an. Unter Sicherheitsfunktionen versteht man Eigenschaften oder in Entsorgungsoptionen ablaufende Prozesse, die in einem sicherheitsbezogenen System oder einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleisten. Robustheit ist die Unempfindlichkeit einer Sicherheitsfunktion gegenüber inneren und äußeren Einflüssen sowie ihre Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit im Sinne des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen. Robustheitsdefizite wurden durch Zusammenführung der Relevanz der Sicherheitsfunktionen und ihrer jeweiligen Robustheit abgeleitet. Robustheitsdefizite wurden immer dann ermittelt, wenn eine deutliche Diskrepanz zwischen der Relevanz einer Sicherheitsfunktion und ihrer realen Robustheit festgestellt wurde. Im Rahmen der vergleichenden Risikobewertung wurden Robustheitsdefizite identifiziert, die auf Schwachstellen verschiedener Entsorgungsoptionen hinweisen. Damit ließ sich sowohl ein Beitrag zur vergleichenden Bewertung von

Tiefenlagern in unterschiedlichen Wirtsgesteinen erzielen als auch zur vergleichenden Bewertung aller bei ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen im Hinblick auf schwere äußere Einwirkungen, zum Beispiel auf die Oberflächenanlagen der Tiefenlageroptionen. Dieser Bewertungsansatz ist naturwissenschaftlich interdisziplinär ausgerichtet. In die Bewertung der Langzeitsicherheit von Tiefenlagern gingen vor allem Wissen zur Geologie, in die Bewertung der Sicherheit gegenüber äußeren Einwirkungen physikalisches Wissen und Kenntnisse zum Strahlenschutz ein.

3.4.4 Risikolandschaft

Bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle nehmen Risiko und Sicherheit eine zentrale Rolle ein. Im ethischen und rechtlichen Diskurs waren, wie sich bei ENTRIA zeigte, offene Fragen zu Themen wie Risiko und Freiwilligkeit, der Regelung von Ungewissheiten oder dem Verhältnis von Sicherheit und Generationengerechtigkeit zu klären. Risiko und Sicherheit spielen in die sozialwissenschaftliche Forschung, beispielsweise zur Risikowahrnehmung, zu Protestbewegungen, Governancefragen und spezifischen Themen wie Long-term Stewardship hinein. Die ingenieur- und naturwissenschaftliche Forschung zu Entsorgungsoptionen wird stark von Sicherheitsanforderungen wie etwa dem Optimierungsgebot im Strahlenschutz geleitet. Daraus leiten sich spezifische Fragestellungen ab, unter anderem zum Design von Lagerbehältern, zum Widerstand von Bauwerken gegenüber schweren Einwirkungen von außen, zur Offenhaltung von Strecken in verschiedenen Wirtsgesteinen aus geomechanischer Sicht oder zu Modellen, die die Ausbreitung von Radionukliden bis in die Biosphäre hinein abbilden.

Die Forschungsplattform ENTRIA bot eine einzigartige Chance für Forschende aus unterschiedlichen Fachdisziplinen, von den Erkenntnissen aus anderen Wissenschaften zu profitieren und voneinander zu lernen. Dies zeigt sich augenfällig an Ergebnissen wie den Publikationen zur Grenzwertthematik (vgl. Kapitel 3.5) oder der Risikokarte. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zum Thema Risiko kommt aber auch in vielen Fachbeiträgen zum Tragen, beispielsweise zu Sicherheit und Strahlenschutz im Rahmen eines Buches zur Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle (Köhnke u. a., 2017).

Abschließend soll beispielhaft eine Analyse erwähnt werden, mit der die Risikolandschaft rund um die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle näher ausgeleuchtet wurde. Diese Untersuchung war auf die Risikoansichten verschiedener Akteure bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle

(Marti, 2016) ausgerichtet und stellte eine wichtige Grundlage für die vergleichende Risikobewertung bei ENTRIA dar. Im Mittelpunkt der Analyse standen die individuelle Risikowahrnehmung und die Meinungsbildung zu Risiken. Es zeigte sich, dass sich bei jeder einzelnen Person bewusste und unbewusste Wahrnehmungen mit Urteilen und Abwägungsprozessen zu Risikoansichten verbinden. Diese Risikoansichten werden sowohl durch Merkmale der Person selbst als auch durch solche der Risikoquelle und der gesellschaftlichen Rahmenbedingungen beeinflusst. Dass sich viele dieser Ansichten in normativen Aspekten unterscheiden, trägt dazu bei, dass der Umgang mit Risiken bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle konfliktbeladen ist. Solche normativen Aspekte betreffen beispielsweise die Frage, ob bei gleichem Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß Risiken mit sehr großen Schadensausmaßen anders zu gewichten sind als solche mit kleinen Schadensausmaßen. Bei normativ unterschiedlichen Risikoansichten Einigung zu erzielen ist anspruchsvoller als sich über verschiedene fachtechnische Ansichten zu verständigen. Die Wertvorstellungen, die normativ unterschiedlichen Risikoansichten zugrunde liegen, sind oft tief verwurzelt und werden von Personen oder gesellschaftlichen Gruppen als Teil ihrer Identität betrachtet. Die Bereitschaft, eigene Haltungen zu hinterfragen, ist daher meistens gering, was die Einigung auf gemeinsame Positionen erschwert.

Im Rahmen von ENTRIA stellte sich die Frage, welche Rolle unterschiedlichen Risikoansichten bei der vergleichenden Risikobewertung zukommen soll. Diese Frage wurde zunächst aus ethischer und nachgelagert auch aus naturwissenschaftlicher Perspektive beantwortet. Bei näherer Untersuchung der Risikoansichten zur Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle zeigen sich mögliche konfliktlösende Ansätze. Diese Lösungsansätze können genutzt werden, wenn es darum geht, Risiken und Sicherheit von Entsorgungsoptionen auf eine Art und Weise zu beurteilen oder miteinander zu vergleichen, die für verschiedene Akteure akzeptabel ist.

Literatur

[Eckhardt u. Rippe 2016] Eckhardt, Anne; Rippe, Klaus P.: *Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Zürich: vdf Hochschulverlag, 2016

[Fischer-Appelt u. Baltes 2010] Fischer-Appelt, Klaus; Baltes, Bruno: *Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen. Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik. Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“*. Köln: GRS, 2010 (GRS A - 3536)

[Köhnke u. a. 2017] Köhnke, Dennis; Reichardt, Manuel; Budelmann, Harald: Wie organisieren andere Länder eine langfristige Zwischenlagerung hoch radioaktiver Reststoffe? In: *Atommüll-Lager: Was soll wann wie wohin - und wer macht was?* Bd. 27. Rehburg-Loccum: Harfe-Verlag und Druckerei GmbH, 2017, S. 101–110

[Marti 2016] Marti, Michèle: Risikoansichten. Wie Merkmale der Person, der Quelle und des Rahmens die Art und Weise beeinflussen, wie Personen die mit der Entsorgung von radioaktiven Abfällen verbundenen Risiken wahrnehmen und bewerten. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2016 (5) – ENTRIA Arbeitsbericht

3.5 Grenzwerte

Strahlenschutz beruht auf drei wesentlichen Grundsätzen: der Rechtfertigung der Tätigkeitsart, der Dosisbegrenzung und der Vermeidung unnötiger Strahlenexpositionen (StrlSchV (2012) und künftig StrlSchG (2017)). Um Schäden durch ionisierende Strahlung zu verhindern, ihre Eintrittswahrscheinlichkeit zu senken bzw. Schäden zu mindern, reguliert der Strahlenschutz auch den Gesundheitsschutz unter anderem über die Festlegung von Grenzwerten. Diese betreffen zum einen direkt die Höhe der Dosis der ionisierenden Strahlung – wie Grenzwerte für die effektive Dosis oder Organdosen (z. B. Augenlinse, Haut, Hände), zum anderen die Höhe der Aktivität oder spezifischen Aktivität der radioaktiven Stoffe, mit denen in unterschiedlichen Tätigkeitsbereichen umgegangen wird. Die Basis für die Festlegung von Grenzwerten und vergleichbaren Größen im Strahlenschutz ist das von der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (International Commission on Radiation Protection, ICRP) vorgeschlagene Regelwerk.

Schon zu Beginn der interdisziplinären Zusammenarbeit im ENTRIA-Verbundvorhaben zeichnete sich besonders im Transversalprojekt 2, aber auch in den Bearbeitertreffen ein hohes Interesse an der Thematik ab, u. a., weil Grenzwerte eine besondere Rolle in der gesellschaftlichen Debatte haben. Sie können zu mehr Akzeptanz aber auch zu mehr Widerspruch im Umgang mit Radioaktivität führen. Es stellte sich heraus, dass alle an ENTRIA beteiligten Disziplinen zu diesem Thema beitragen konnten, gerade weil bei der Festlegung und dem Umgang mit Grenzwerten in erheblichem Maße nicht-technische Gesichtspunkte eine Rolle spielen. Zugleich eignen Grenzwerte sich dazu, in anschaulicher Weise Konflikte und Spannungen wissenschaftlich und interdisziplinär im Rahmen von ENTRIA aufzugreifen.

Als Thema interdisziplinärer Bearbeitung und Verständigung wurde das Thema Grenzwerte in ENTRIA aus zwei unterschiedlichen Richtungen angegangen: Punktuell verabredeten das IRW Braunschweig und IRS Hannover eine gemeinsame Kooperation hinsichtlich der Grenzwertbildung im Strahlenschutz. Daneben wählte eine interdisziplinäre Arbeitsgruppe Grenzwerte ENTRIA-übergreifend als Querschnittsthema aus Governance-Perspektive zur gemeinsamen und gehaltvollen wissenschaftlichen Auseinandersetzung aus (Brunnengraber u. a., 2016). Nicht zuletzt aufgrund dieser Schwerpunktsetzung und fachlichen Aufarbeitungen wurden Grenzwerte bei einem ENTRIA-Bearbeiter-Treffen und einem Treffen mit dem ENTRIA-Beirat – jeweils im Frühjahr 2015 in Berlin – ein Schwerpunktthema.

3.5.1 Grenzwertbildung im Strahlenschutz – Werkstattgespräch und Tagungsband

In Zusammenarbeit mit FFU initiierte das IRS gemeinsam mit dem IRW das ENTRIA-Werkstattgespräch „Grenzwertbildung im Strahlenschutz“ in Braunschweig am 27. Januar 2015. Nachfolgend wurde ein dazugehöriger Tagungsband herausgegeben. Das Thema Grenzwerte wurde aus dem Blickwinkel unterschiedlicher Disziplinen beleuchtet: Die Ableitung von Grenzwerten stößt immer wieder auf Kritik und Unverständnis. Das wird auch bei der Langzeitzwischenlagerung oder dauerhaften Tiefenlagerung hoch radioaktiver Abfälle nicht anders sein. Das Werkstattgespräch sollte zur Klärung und Transparenz in der Problematik beitragen. Folgende Themen wurden behandelt:

- Heterogenität von Grenzwertsystemen – Strukturen, Konzepte, Kritik (Claudia König, IRS, Leibniz Universität Hannover),
- Grenzwertbildung in der Arbeit von Fachgremien (Rainer Gellermann, Nuclear Control and Consulting GmbH),
- Grenzwertbildung aus toxikologischer Sicht (Heidi Foth, Universität Halle-Wittenberg),
- Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Grenzwertfestlegung – eine Perspektive für die Strahlenschutzverordnung? (Ulrich Smeddinck).

Das Thema „Grenzwertbildung im Strahlenschutz“ wurde einerseits vor der sich abzeichnenden Neugestaltung des deutschen Strahlenschutzrechts im Anschluss an europäische Novellierungen aufgegriffen. Andererseits wurde in der deutschen Rechtswissenschaft – der VW-Skandal war noch fern – ein „Wahrnehmungsstillstand“ (Röthel, 2011) zum Thema Grenzwerte konstatiert.

Die Befassung mit der Thematik baute auf den bisherigen Arbeiten zu Grenzwerten in der Rechtssoziologie (Winter, 1986), der Rechtswissenschaft (Röthel, 2013; Reinhardt, 2015; Hendler, 2010; Böhm, 1996, 2005, 2008), der Umweltforschung (Gellermann u. a., 2010; Pönitz u. Tawussi, 2016) und den Debatten in der Umweltschutzbewegung (Kortenkamp u. a., 1989) auf. Die Thematik stand und steht aber auch für eine Neuorientierung der Auseinandersetzung über Grenzwerte und Grenzwertbildung. Von einem „Wahrnehmungsstillstand“ kann unter dem Eindruck der wachsenden Partizipationsansprüche der Gesellschaft kaum noch gesprochen werden. Aus dem Politikfeld Entsorgung radioaktiver Reststoffe, dem Diskussionsstand und der Beschaffenheit der Konflikte war

ein klares Forschungsinteresse abzuleiten, den Stand der Entwicklung zu analysieren und ggf. Reformbedarf zu formulieren. Das Bewusstsein wächst, dass Grenzwerte und ihre Festsetzung nicht bloß Sachfragen sind, die der kundigen Expertokratie überlassen werden sollten, sondern, dass implizit „fundamentale Werturteile“ enthalten sind (Nanz u. Leggewie, 2016, S. 13). Für die Bildung oder die Debatte über Werturteile sind Experten aber nicht ausgebildet (Saretzki, 2005, S. 348ff). Deshalb bedarf es der Beteiligung der Öffentlichkeit in dafür geeigneten Foren (Grunwald, 2008, S. 371), (Nanz u. Leggewie, 2016, S. 13).

Im Rahmen des Werkstattgesprächs wurde die Thematik mit den vier o. g. Vorträgen aus Physik, Recht und Toxikologie aus unterschiedlichen disziplinären Blickwinkeln und mit dem Anspruch einer „Heranführung“ in die Thematik aufgerollt. Für den Tagungsband wurde noch ein weiterer Beitrag von Torsten Gierke und Max Würtemberger (beide GNS Essen) zur rechtspolitischen Entwicklung aufgenommen, um die Thematik einzuordnen und den Band abzurunden (Smeddinck u. König, 2016):

Claudia König machte zum Ausgangspunkt ihres Beitrags (König, 2016) die Beobachtung, dass vielfach die Gesprächspartner in Diskussionen rund um Strahlenschutz-relevante Fragestellungen leicht aneinander vorbeireden. Strahlenschutz ist eine Schutzdisziplin, die gleichzeitig Regelungen zum Arbeitsschutz, Produktschutz, Umweltschutz und Notfallschutz trifft. Sie erfordert physikalische Kenntnisse und wendet ein System der Risikobetrachtung (Dosimetrie) an, für das kein direktes Analogon aus der konventionellen Toxikologie herangezogen werden kann. Daher galt es zunächst, die Grundlagen des Strahlenschutzes als gemeinsame Basis in verlässlicher Weise darzustellen.

Die gesellschaftlich notwendige Diskussion über die Endlagerung radioaktiver Abfälle führte u. a. zu der Frage der damit verbundenen Strahlenexposition. Rainer Gellermann stellte konsequenterweise unterschiedliche Möglichkeiten zur Bewertung von Strahlenexpositionen des Menschen vor (Gellermann, 2016). Er konturierte einen strahlenschutzfachlichen Rahmen, der bei einem öffentlichen Diskurs über Grenz- oder Richtwerte im Zusammenhang mit der Endlagerung berücksichtigt werden sollte. Ausgehend von der Abgrenzung solcher Strahlenexpositionen, welche Gegenstand von Strahlenschutz sind, zeigte er, dass Maßstäbe für Dosen aus biologischen Strahlenwirkungen oder aus Bezügen zu natürlichen Situationen heraus ableitbar sind. Aber auch unterschiedliche kulturelle Sichtweisen spielen dabei eine nicht zu unterschätzende Rolle. Die Festlegung von Dosiswerten als Beurteilungsmaßstab zur Entscheidungsfindung erfordert es, Dosiswerten eine Funktion im System des Strahlen-

schutzes zuzuordnen. Grenzwerte sind in diesem System nur ein Element unter vielen.

Für die Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern wird daher zur Zeit die Verwendung von Dosiswerten nicht als Grenz- sondern als Indikatorwert empfohlen. Soweit Fragen der möglichen Strahlenexpositionen in ferner Zukunft zu betrachten sind, ist die Festlegung von (effektiven) Dosen, die als Maßstab einer Beurteilung dienen können, eine besondere Herausforderung. Um die damit verbundenen Fragen in einen partizipativen Prozess mit der Öffentlichkeit einzubinden, ist es nötig, dass allen Beteiligten die (natur-)wissenschaftlichen Bezüge, die gesellschaftlichen Erwartungen und die Konsequenzen von Festlegungen bewusst sind.

Heidi Foth betonte aus toxikologischer Sicht, dass Grenzwerte dem Schutz der Gesundheit und der Umwelt dienen (Foth u. a., 2016). Sie haben u. a. auch großen Einfluss auf die technische Ausgestaltung von Arbeitsplätzen oder Prozess-Abläufen. Der Eintrag von Schadstoffen in die Luft wird durch Emissionsgrenzwerte gemindert. Konsumentenseitig ist die maximal zulässige Schadstoffbelastung des Trinkwassers und der Nahrung durch entsprechende Grenzwerte geregelt. Die wissenschaftliche Ableitung risikobasierter Grenzwerte im Arbeitsschutz wird durch die Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der DFG („MAK“-Kommission) erarbeitet, die Stoffe nach bestimmten, toxikologisch relevanten Eigenschaften einstuft, sofern es Anhaltspunkte dafür gibt und die Datenlage für eine Beurteilung ausreicht. Anderenfalls wird kein MAK-Wert vorgeschlagen. Die Behörden (u. a. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Bundesinstitut für Risikobewertung) sind aufgefordert, auch bei Informationslücken den Gesundheitsschutz der Bevölkerung zu gewährleisten, und sie wenden Bewertungsregeln an, um durch Abstandsregeln und Referenzszenarien Grenzwerte abzuleiten. Die technischen Regeln zur Überbrückung von Informationslücken bauen auf wissenschaftlich begründeten Vergleichen und Plausibilitäten auf; sie sind daher nicht willkürlich, sondern sachlich begründet.

Schon in der Vergangenheit wurde die mangelnde Beteiligung von Öffentlichkeit und gesellschaftlichen Gruppen bei der Grenzwertbildung hinterfragt. Umso mehr springt angesichts der vielfältigen Bemühungen um neue Formen der Kooperation und Partizipation die bisherige Struktur der Verfahren hin zu verbindlichen Grenzwerten ins Auge; gelten sie doch als wenig transparent und demokratisch. Schwerpunktmäßig untersuchte daher Smeddinck (2016) aus interdisziplinär informierter rechtswissenschaftlicher Perspektive, wie diesen Ansprüchen stärker Rechnung getragen werden kann. Dazu wurden Funktion und Stellung der Grenzwert-

te im deutschen Umweltrecht verdeutlicht. Der regulatorische Rahmen der Grenzwerte im Strahlenschutz wurde ebenfalls beleuchtet.

Kontrastiert wurde im Weiteren die Anhörung beteiligter Kreise als Ansatz sachverständiger Regulierung mit der Neubewertung der Öffentlichkeitsbeteiligung in unseren Tagen. Die rechtswissenschaftliche, bis dato unhinterfragte, Dogmatik, die einheitlich Fachöffentlichkeit (auch: Fachbruderschaft) zur Erarbeitung und Festlegung von Grenzwerten befürwortete, wurde angegriffen. Der geeignete Hebel dafür war, den positiv konnotierten Begriff der Fachbruderschaft durch den negativ konnotierten Begriff des Kastenregiments aufzugreifen, um darauf aufbauend eine dogmatische Perspektive aufzubauen, die den Bedürfnissen nach mehr Transparenz und Beteiligung der Öffentlichkeit besser Rechnung trägt. Als neues Regulierungsmuster bot sich die neue rechtswissenschaftliche Diskussion zur Öffentlichkeitsbeteiligung beim Erlass von Verordnungen wie z. B. der Strahlenschutzverordnung an. Auch wenn es mittlerweile ein Strahlenschutzgesetz gibt, hat sich dieser Vorschlag nicht erschöpft. Zum einen gibt es im Strahlenschutzgesetz Ermächtigungen zur Schaffung von 50 Verordnungen, die im Laufe des Jahres 2018 erarbeitet werden sollen. Zum anderen erfasst die Stoßrichtung des Ansatzes die Gesamtbreite des Umweltrechts, wo immer vergleichbare Konstellationen zu finden sind.

Im erweiterten Tagungsband informierten Gierke u. Würtemberger (2016) über die wesentlichen Regelungsgegenstände der neuen Euratom-Strahlenschutzgrundnormen, die einen harmonisierten Schutz vor der schädigenden Wirkung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung in Europa definieren. Die Vorgaben der Grundnormen wurden z. T. bis Februar 2018 in nationales Recht übertragen, z. T. erfolgt das bis Ende 2018. Die Neuerungen führen zu umfangreichen Änderungen der deutschen Rechtsvorschriften im Bereich des Strahlenschutzes. Es handelt sich dabei um die Themen „Naturally Occurring Radioactive Material“ (NORM), Radon in Innenräumen, Grenzwert für die Organdosis der Augenlinse, sowie in begrenztem Umfang Strahlenschutzexperte /Strahlenschutzbeauftragter, Dosisrichtwerte und Freigabe bzw. Freigrenzen. Auch wenn neue Regelungen entstehen bzw. bestehende Vorgaben angepasst werden müssen, so bleibt doch das Gesamtkonzept des deutschen Strahlenschutzes bestehen. Es werden lediglich einzelne Themenfelder verändert. Bei einer Anpassung der deutschen Rechtsvorschriften im Strahlenschutz an die neuen Regelungen werden bewährte Verfahren und Regelungen soweit möglich beibehalten. Neuregelungen und Überarbeitungen sollten nur bei Themen stattfinden, bei denen ein verbesserter Schutz für Mensch und die Umwelt erzielt werden kann. Dies entspricht dem internationalen Prinzip von „continuity and stability“.

Über das Werkstattgespräch und den anschließenden Tagungsband wurden diese Inhalte Studierenden der TU Braunschweig, ENTRIA - Mitarbeiterinnen und - Mitarbeitern, sowie der interessierten Öffentlichkeit bekannt gemacht.

3.5.2 Grenzwerte-Papier

In mehreren Veröffentlichungen (Kalmbach u. Röhlig, 2016; Walther u. a., 2015) und Vorträgen auf nationalen und internationalen Konferenzen wurde die Rolle von Grenzwerten aus der interdisziplinären Sicht von ENTRIA dargestellt und diskutiert. Es wurden Fragen aufgeworfen, inwieweit Grenzwerte bei der Lösung des Problems der Entsorgung radioaktiver Abfälle dienlich oder eventuell sogar hinderlich sein können. Während die bisher beschriebenen Fakten durchaus Parallelen auch in anderen Technikfeldern aufweisen, besitzt die Genese von Grenzwerten im Bereich Radioaktivität gewisse Besonderheiten. Aufgrund des erheblichen „Untergrundes“ natürlicher Strahlung, der zudem lokal und individuell signifikante Schwankungen aufweist, wird in der Umwelt nur der anthropogene Anteil betrachtet, während sich Grenzwerte anderer toxischer Stoffe in Umweltmedien und Lebensmitteln immer auf Gesamtkonzentrationen beziehen. Generell sind Grenzwerte stets das Resultat wissenschaftlicher, gesellschaftlicher und politischer Aushandlungsprozesse und Festlegungen. Solche Prozesse beruhen sowohl auf Wissensbeständen als auch auf Wahrnehmungen und Interessenlagen. Grenzwerte stehen nie für sich allein, sondern immer im Kontext ganzer Regelwerke. Grenzwerte haben die Aufgabe, Höchstwerte für bestimmte Belastungen, Emissionen und Immissionen festzulegen. Oberhalb von Grenzwerten, so das allgemeine Verständnis des Konzepts, kann es zu gesellschaftlich nicht tolerierten Auswirkungen auf Menschen, Tiere, Pflanzen oder die Umwelt kommen. Grenzwerte dienen auf der anderen Seite aber auch der Planungssicherheit von Unternehmen, deren Produkte, umweltbelastende Emissionen oder Anlagen bei Einhaltung der Grenzwerte als zulassungsfähig bzw. genehmigungsfähig eingestuft werden müssen.

In einem als ITAS-ENTRIA-Bericht veröffentlichten Arbeitspapier (Brunnengräber u. a., 2016) wurden dreizehn Thesen zur tiefergehenden Auseinandersetzung mit der Frage erstellt, welche Rolle Grenzwerte bei der Behandlung und Entsorgung radioaktiver Reststoffe haben könnten. Es handelt sich hierbei nicht notwendigerweise um die Meinung der Autoren, sondern um mögliche Argumentationen, die teilweise in Diskussionen vorgebracht werden. Daher wurden etliche der nachfolgenden Aussagen im Konjunktiv formuliert. Zum Beispiel wird thematisiert, dass

ionisierende Strahlung je nach Herkunft (anthropogen oder natürlich) unterschiedlich wahrgenommen wird. Aber auch bezogen auf anthropogene Quellen herrscht eine differenzierte Wahrnehmung. Während z. B. Grenzwerte für Freisetzungen radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung im Zusammenhang mit kerntechnischen Anlagen von weiten Teilen der Bevölkerung kritisch debattiert werden, existiert eine Debatte zum Einsatz ionisierender Strahlung oder von radioaktiven Stoffen in der Medizin lediglich für die zunehmende Anwendung der Computertomographie, und auch das nur in Expertenkreisen. Während man bei der Anwendung von Strahlenquellen in der Medizin den Nutzen durchaus wahrnimmt, ist dies bei ionisierender Strahlung, die von umstrittenen kerntechnischen Anlagen und den entstehenden radioaktiven Abfällen ausgeht, nicht der Fall. Speziell bei anthropogenen radioaktiven Stoffen und ionisierender Strahlung wird in der Wahrnehmung der Bevölkerung nicht von einem Schwellenwert und auch nicht von einer trivialen Dosis (nach ICRP, 2007)) ausgegangen, sondern von einer generellen Schädlichkeit auch in kleinsten Dosen. Vielfach wird hier die Aussagekraft und Belastbarkeit des LNT-Modells im Bereich kleinster Dosen bewusst oder unbewusst überschätzt. Daher rührt eine weit verbreitete Forderung nach Null-Emission. Dies steht in klarem Widerspruch zum Konzept der Grenzwertsetzung. Es wird die These aufgeworfen, dass der lange vermittelte Eindruck „absoluter Sicherheit“ und „völlig unschädlicher Emissionen“ durch Betreiber kerntechnischer Anlagen oder Kernanlagen und durch Befürworter der Kernenergie zu einem Vertrauensverlust in Regelungssysteme zur Minimierung der Freisetzung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung geführt haben könnte. Dieser Vertrauensverlust könnte damit eine zentrale Ursache für die unterschiedliche Bewertung von Grenzwerten darstellen.

Die Festlegung eines strikt einzuhaltenden Grenzwertes für eine bestimmte Belastung könnte in der Bevölkerung als genereller Gefahrenhinweis interpretiert werden. Der Grundgedanke würde dabei dementsprechend lauten: Oberhalb des Grenzwertes besteht eine (erhebliche) Gefahr, unterhalb des Grenzwertes kann nicht von absoluter Sicherheit ausgegangen werden.

Ein prinzipieller Konflikt bei der Grenzwertfestlegung ist der folgende: „Grenzwerte sind so festzulegen, dass durch ihr Einhalten mit technischen Mitteln ein akzeptables Kosten-Nutzen-Verhältnis erreicht wird“ versus „Grenzwert soll das sein, was technisch erreichbar ist. Kosten spielen dabei keine Rolle“. Letzteres kann in die o. g. Forderung nach einer „Null-Emission“ münden. Oben dargelegter Konflikt kann zu Angriffen aus unterschiedlichen Richtungen führen. Regulierungssysteme

mit Grenzwerten für ionisierende Strahlung und Freisetzung radioaktiver Stoffe können sowohl hinsichtlich technisch-naturwissenschaftlicher Elemente (Debatte über Richtigkeit der ICRP-Modelle) als auch hinsichtlich politischer Elemente (Debatte über das IAEA-WHO-Agreement) in Frage gestellt werden.

Aufbauend auf diesen Überlegungen muss danach gefragt werden, inwiefern Vertrauen und Misstrauen in spezifische Akteure die individuelle Risikowahrnehmung beeinflussen. Weitere und zudem hoch politisierte Themenfelder werden berührt, wenn man diskutiert, ob unterschiedliche Risikowahrnehmungen in unterschiedlichen Akteursgruppen einander angenähert oder sogar zur Übereinstimmung gebracht werden können. In direktem Zusammenhang damit steht das Thema „Kommunikation“. Als abschließende These wird daher in (Brunnengräber u. a., 2016) eine erweiterte Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Grenzwertsetzung ins Gespräch gebracht. Könnte so bei der Errichtung kerntechnischer Anlagen und im speziellen Fall beim Bau eines Endlagers eine Konfliktentlastung erreicht werden?

Literatur

[Brunnengräber u. a. 2016] Brunnengräber, Achim; Hocke, Peter; Kalmbach, Karna; König, Claudia; Röhlig, Klaus-Jürgen; Kuppler, Sophie; Smeddinck, Ulrich; Walther, Clemens: Grenzwerte beim Umgang mit radioaktiven Reststoffen. Arbeitsbericht des ENTRIA-Transversalprojekts 2 (Überarbeitete Version). 2016 (1) – Interner Bericht

[StrlSchV 2012] Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, für Gesundheit, für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: *Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV)*. 2012 – Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 7 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist

[Böhm 1996] Böhm, Monika: *Der Normmensch. Materielle und prozedurale Aspekte des Schutzes der menschlichen Gesundheit vor Umweltschadstoffen*. Tübingen: Mohr, 1996 (Jus publicum 16)

[Böhm 2005] Böhm, Monika: Risikoregulierung und Risikokommunikation als interdisziplinäres Problem. In: *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht* (2005), Nr. 6, S. 609–615

- [Böhm 2008] Böhm, Monika: Wissenschaftliche Beratung und Rechtsanwendung im Strahlenschutz. In: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.); Koch, Hans-Joachim (Hrsg.); Roßnagel, Alexander (Hrsg.): *13. Deutsches Atomrechtssymposium* Bd. 14. Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co KG, 2008, S. 251–264
- [StrlSchG 2017] Deutscher Bundestag: *Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG)*. 2017 – Strahlenschutzgesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das durch Artikel 2 des Gesetzes vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966) geändert worden ist
- [Foth u. a. 2016] Foth, Heidi; Wiese, Jan; Glahn, Felix: Ableiten von Grenzwerten in der Toxikologie. In: Smeddinck, Ulrich (Hrsg.); König, Claudia (Hrsg.): *Grenzwertbildung im Strahlenschutz: Physik, Recht, Toxikologie: Grundlagen, Kontraste, Perspektiven*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2016 (Braunschweigische rechtswissenschaftliche Studien), S. 63–80
- [Gellermann 2016] Gellermann, Rainer: Maßstäbe zur Bewertung von Dosen im Strahlenschutz im Kontext der Endlagersuche. In: (Smeddinck u. König, 2016), S. 41–61
- [Gellermann u. a. 2010] Gellermann, Rainer; Günther, Petra; Evers, Burkhard: Beurteilung von Bodenkontaminationen mit Radioaktivität im Gebiet Hannover-List nach Maßstäben und Ansätzen der BBodSchV. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 22 (2010), Nr. 2, S. 694–701
- [Gierke u. Würtemberger 2016] Gierke, Torsten; Würtemberger, Max: Aktuelle Entwicklungen im Strahlenschutz. In: (Smeddinck u. König, 2016), S. 113–131
- [Grunwald 2008] Grunwald, Armin: *Technik und Politikberatung: philosophische Perspektiven*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 2008 (Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft 1901)
- [Hendler 2010] Hendler, Reinhard: Rechts- und naturwissenschaftliche Kooperation im Umweltrecht am Beispiel des Chemikalien- und Naturschutzrechts. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 22 (2010), Nr. 2, S. 85–90
- [ICRP 2007] Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. In: *Annals of the ICRP* (2007)

- [Kalmbach u. Röhlig 2016] Kalmbach, Karena; Röhlig, Klaus-Jürgen: Interdisciplinary Perspectives on Dose Limits in Radioactive Waste Management. A Research Paper Developed within the ENTRIA Project. In: *Journal of Radiological Protection* 36 (2016), Nr. 2, S. 8–22
- [Kortenkamp u. a. 1989] Kortenkamp, Andreas (Hrsg.); Grahl, Birgit (Hrsg.); Grimme, L. H. (Hrsg.): *Die Grenzenlosigkeit der Grenzwerte: Zur Problematik eines politischen Instruments im Umweltschutz*. Karlsruhe: C.F. Müller, 1989 (Alternative Konzepte 63)
- [König 2016] König, Claudia: Einführung in den Strahlenschutz - Grundlagen, Grenzwertkonzepte, Heterogenität. In: (Smeddinck u. König, 2016), S. 21–40
- [Nanz u. Leggewie 2016] Nanz, Patrizia; Leggewie, Claus: *Die Konsultative: mehr Demokratie durch Bürgerbeteiligung*. Berlin: Verlag Klaus Wagenbach, 2016 (Politik bei Wagenbach 749)
- [Pönitz u. Tawussi 2016] Pönitz, Erik; Tawussi, Frank: Schutz vor ionisierender Strahlung - Ein Einblick in die Disziplin und interdisziplinäre Verknüpfungspunkte. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, 49–58
- [Reinhardt 2015] Reinhardt, Michael: Grenzwerte – Fluch oder Segen? Entwicklungslinien im Umweltrecht zwischen Rechtssicherheit und praktischer Urteilskraft. In: *Natur und Recht* 37 (2015), Mai, Nr. 5, S. 289–297
- [Röthel 2011] Röthel, Anne: *Techniksteuernde Grenzwerte – Wahrnehmungsstillstand und Zukunftsaufgabe*. 2011
- [Röthel 2013] Röthel, Anne: Techniksteuernde Grenzwerte – Gewöhnungseffekte und Zukunftsaufgaben. In: *Juristen Zeitung* 68 (2013), Nr. 23, S. 1136–1143
- [Saretzki 2005] Saretzki, Thomas: Welches Wissen — wessen Entscheidung? Kontroverse Expertise im Spannungsfeld von Wissenschaft, Öffentlichkeit und Politik. In: Bogner, Alexander (Hrsg.); Torgersen, Helge (Hrsg.): *Wozu Experten?* Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2005, S. 345–369
- [Smeddinck 2016] Smeddinck, Ulrich: Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Grenzwertfestlegung - eine Perspektive für die Strahlenschutzverordnung. In: (Smeddinck u. König, 2016), S. 81–112

- [Smeddinck u. König 2016] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.); König, Claudia (Hrsg.): *Grenzwertbildung im Strahlenschutz - Physik, Recht, Toxikologie. Grundlagen, Kontraste, Perspektiven*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2016
- [Walther u. a. 2015] Walther, Clemens; Röhlig, Klaus-Jürgen; Smeddinck, Ulrich: ENTRIA - oder die Chancen des Interdisziplinären. In: *StrahlenschutzPRAXIS* 2015 (2015), Nr. 2, S. 28–34
- [Winter 1986] Winter, Gerd (Hrsg.): *Umweltrechtliche Studien – Studies on Environmental Law*. Bd. 1: *Grenzwerte. Interdisziplinäre Untersuchungen zu einer Rechtsfigur des Umwelt-, Arbeits- und Lebensmittelschutzes*. Düsseldorf: Werner, 1986

3.6 Technische und gesellschaftliche Aspekte des Monitorings

3.6.1 Einleitung

Das Design und die Ausführung ingenieurtechnischer Anlagen basieren auf einer meist nur stichprobenartigen Datengrundlage sowie ingenieurtechnischen Modellen, die ein meist vereinfachendes Modell der realen physikalischen Gegebenheiten darstellen. Erst diese Vereinfachungen ermöglichen die den Planungen zugrundeliegenden numerischen Analysen. Zur Validierung der Modelle und der Datenbasis werden die in-situ-Verhältnisse, Zustandsänderungen und Prozesse messtechnisch erfasst, ausgewertet sowie interpretiert und mit den Ergebnissen der numerischen Simulationen verglichen. Dieser Monitoringprozess dient in einem Tiefenlager dazu, die Modelle den in-situ-Verhältnissen besser anzupassen. In der Folge lässt sich auf unerwartete negative Entwicklungen reagieren. Das kann eine Anpassung bzw. Korrektur der Planung des Tiefenlagers umfassen oder die Möglichkeit, die radioaktiven Reststoffe nach ihrer Einlagerung auf eine geplante Weise wieder aus dem Tiefenlager zu entfernen. Es unterstützt die Entwicklung einer adäquaten / gesunden Fehlerkultur, da auf Fehlplanungen und -einschätzungen reagiert werden kann. Die Ergebnisse des Monitorings stellen somit letztendlich die Grundlage für die Entscheidung Rückholung / Überführung in ein Tiefenlager dar. Monitoring ist für ein Tiefenlager mit Rückholbarkeit damit zwingend erforderlich und Bestandteil des Sicherheitskonzepts.

Das Monitoring beinhaltet generell die messtechnische Erfassung von Indikatoren für Zustände oder Zustandsveränderungen, die zumeist noch in die relevanten Zustandsgrößen umgerechnet werden müssen. Je nach zu erfassender Größe beginnt das Monitoring bereits mit der Erschließung des Standortes bzw. der Auffahrung des Tiefenlagerbergwerks. Anhand der gewonnenen Daten können beispielsweise frühzeitig Annahmen zum geologischen Modell validiert und ein Protokoll über die zeitliche Entwicklung des Tiefenlagers geführt werden. Das Monitoring untertage wird bis zum Verschluss des Endlagers fortgeführt. Die in der Offenhaltungsphase erfassten Prozesse dienen der Überwachung des Zustands der eingelagerten Behälter, der Integrität der geotechnischen und geologischen Barrieren sowie der zeitlichen Entwicklung des gesamten Tiefenlagers. Ein Umweltmonitoring, beispielsweise in den für die Trinkwassergewinnung genutzten Grundwasserhorizonten, ist nicht Gegenstand der vorliegenden Ausarbeitungen.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Ansätze, Ziele und Grenzen des Monitorings erläutert (vgl. Abschnitt 3.6.2). Danach schließt sich die Beschreibung der messtechnischen Erfassung der Zustandsgrößen und -veränderungen vom Einlagerungsbehälter über den Versatz bis ins Wirtsgestein unter Berücksichtigung der Kontaktbereiche an. Damit werden die technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren behandelt (vgl. Abschnitte 3.6.4 und 3.6.5). Nach Darstellung dieser technischen Aspekte folgt im Abschnitt 3.6.6 die gesellschaftliche Relevanz des Monitorings. Abschließend gibt der Abschnitt 3.6.7 einen Überblick zu Aspekten, die noch einen Klärungsbedarf mit sich bringen und somit einer tiefergehenden Auseinandersetzung bedürfen.

3.6.2 Ziele und Grenzen des Monitorings im Nahfeld-Bereich

Ziele des Behältermonitorings

Die Funktion der technischen Barriere bei der Tiefenlagerung, welche durch den Endlagerbehälter repräsentiert wird, unterliegt einem Wandel während der zeitlichen Entwicklung des Lagers. Auch die Funktionen, welche der Lagerbehälter erfüllen muss, werden zu weiten Teilen von der umgebenden Geologie, also dem Wirtsgestein beeinflusst. Ein repräsentatives Beispiel für diesen Einfluss ist die Forderung nach der Dichtheit des Lagerbehälters. Bei einer Lagerung in kristallinem Wirtsgestein muss die Rückhaltung der Radionuklide über einen Zeitrahmen von mehreren 100.000 Jahren durch den Behälter gewährleistet werden, während der erforderliche dauerhafte Einschluss des radioaktiven Abfalls im Salzgestein nach einer Zeitspanne von einigen hundert Jahren von der geologischen Barriere (Einschlusswirksamer Gebirgsbereich ewG) übernommen wird. Die Anforderungen an den Behälter werden also in großem Maße von der Geologie des Lagerstandortes beeinflusst. Aufgrund der derzeit noch laufenden ergebnisoffenen Endlagersuche in Deutschland gibt es noch keine Standortentscheidung und somit auch noch keinen Behälter zur Tiefenlagerung. Um den Einfluss des Wirtsgesteins bei den weiteren Arbeiten im Rahmen von ENTRIA berücksichtigen zu können, wurden auf der Grundlage der im Rahmen von ENTRIA erarbeiteten Wissensbasis generische, wirtsgesteinsabhängige ENCON-Behälterkonzepte (ENTria CONTainer) für die Tiefenlagerung sowie für die langfristige Oberflächenlagerung entwickelt, siehe auch Kapitel 3.2.9.

Ausgehend von den unterschiedlichen Randbedingungen der Behälterlagerung ergibt sich auch eine unterschiedliche Wichtung der potentiell zu überwachenden Parameter. Hieraus ergeben sich dementsprechend

verschiedene Ziele, die mit dem Monitoring der Einlagerungsbehälter verfolgt werden. Allerdings können zwei Hauptziele identifiziert werden, auf die nachfolgend vertiefend eingegangen werden soll.

Das erste Ziel des Behältermonitorings ist es, durch die Erfassung der Entwicklung einzelnen Parametern der Behälter, die der Auslegung der Behälter zugrunde liegenden Modelle, beispielsweise zum Korrosionsverhalten der Behälterwerkstoffe, zu validieren. Hierdurch werden Prognosen darüber möglich, ob der Behälter die an ihn gestellten Anforderungen auch in Zukunft erfüllen kann. Die Entwicklung der Behälter wird zu großen Teilen von den Wechselwirkungen mit der Umgebung und dem eingeschlossenen Inventar bestimmt. Ein Monitoring, welches der Validierung von Modellen und Simulationen der Entwicklung der technischen Barriere dienen soll, muss demnach zwei Aspekte berücksichtigen. Zum einen muss angestrebt werden, dass möglichst viele Daten erfasst werden, die es ermöglichen, die Entwicklung der Behälter direkt zu erfassen. Da die Entwicklung des Behälters immer von den äußeren Einwirkungen sowie der Wechselwirkung von Behälter und Lagerumfeld beeinflusst wird und viele Parameter des Behälters nicht direkt erfasst werden können, ist eine reine Beobachtung der Behälterentwicklung zum Zweck der Modellvalidierung nicht ausreichend. Erst die Zusammenführung der Messdaten der Behälterentwicklung mit weiteren Daten, die im Behälterumfeld gewonnen werden und die Entwicklung der Umgebungsbedingungen erfassen, ermöglicht eine Validierung der Modelle, welche der Auslegung der Behälter zugrunde lagen. Auch ein korrigierender Eingriff wird hierdurch gegebenenfalls möglich. Ein Monitoring der technischen Barriere mit dem Zweck der Modellvalidierung bedingt somit immer sowohl die Erfassung der Eigenschaftsveränderung des Behälters als auch der tatsächlichen Einwirkungen auf den Behälter. Ein Monitoring mit dem Zweck der Validierung der Auslegungsmodelle erfordert somit die Erfassung von einer Vielzahl von Messwerten und stellt hohe Anforderungen an die Messtechnik und den Umfang der Instrumentierung von Behälter und Behälterumfeld. Auf die hieraus resultierenden Probleme und Herausforderungen wird im Abschnitt 3.6.3 noch vertiefend eingegangen.

Das zweite Ziel, das mit dem Behältermonitoring verfolgt wird, ergibt sich aus der Forderung die Rückholung der Behälter aus dem Tiefenlager zu ermöglichen, welche unter anderem in den Sicherheitsanforderungen des BMU aus dem Jahr 2010 (BMU, 2010), dem Standortauswahlgesetz (StandAG, 2017) sowie dem zugrunde liegenden Abschlussbericht der Endlagerkommission (Endlagerkommission, 2016) gefordert werden. Um eine sichere und planbare Rückholung der Lagerbehälter aus dem Tiefenlager zu ermöglichen, müssen diese für alle Wirtsgesteine, so gestal-

tet werden, dass ihre Integrität und Dichtheit über den Zeitrahmen einer potentiellen Rückholung gewährleistet ist. Eingelagerte Behälter, deren strukturelle Unversehrtheit und Dichtheit nicht gewährleistet sind, stellen bei Handhabungsvorgängen zur Rückholung ein hohes Sicherheitsrisiko für Personal und Umwelt dar. Einflüsse oder Vorgänge, welche zu einem vorzeitigen Versagen führen, sollten somit rechtzeitig und sicher erkannt werden. Auch wenn in den derzeitigen Konzepten zur geologischen Tiefenlagerung von der Integrität der technischen Barriere (Behältersystem) über den Zeitrahmen einer möglichen Bergung ausgegangen wird, muss aufgrund der statischen Ausfallwahrscheinlichkeit des Behältersystems für die Rückholoption eine umfassende Sicherheitsanalyse erfolgen. Insbesondere bei der Einlagerung und Verfüllung können Schädigungen an der Behälteroberfläche und den Lastanschlagpunkten entstehen, die eine lokale Korrosion am Behälter begünstigen können. Durch die Integration der technischen Barriere in das Monitoringkonzept wird es möglich, Beschädigungen des Behälters zu detektieren bevor zum Beispiel Undichtigkeiten entstehen, die eine sichere Rückholung erschweren oder verhindern würden.

Im Detail erfordert die Gewährleistung der Rückholbarkeit aus dem Tiefenlager die Überwachung der Behälterentwicklung während der Betriebsphase und einer zusätzliche Beobachtungsphase vor der Überführung des Lagerbergwerks in ein Endlager. Hierbei ergeben sich zwei unterschiedliche Ansätze des Behältermonitorings.

Der erste Ansatz verfolgt das Ziel Daten zu gewinnen, welche eine planbare Rückholung der Behälter ermöglichen. Hierbei müssen insbesondere Parameter überwacht werden, welche einen direkten Einfluss auf den Rückholablauf besitzen. Beispiele hierfür sind die Dichtheit der Behälter, die Lage des Behälters im Tiefenlager sowie die Temperaturentwicklung von Behälter, Versatzmaterial und Lagerumfeld. Dieser Ansatz liefert demnach Daten, welche eine Aussage darüber ermöglichen, ob und mit welchem Aufwand eine Rückholung der Behälter möglich ist. Allerdings lassen sich aus diesen Daten nur wenige Informationen über die zukünftige Entwicklung der Behälter ableiten.

Der zweite Ansatz verfolgt das Ziel auch Aussagen über die zukünftige Entwicklung der Behälter zu ermöglichen und kann somit auch einen Beitrag zur Datenbasis liefern, anhand derer über die potentielle Rückholung der Behälter oder die Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager entschieden werden muss. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen, wie beim Monitoring mit dem Ziel der Modellvalidierung, weitere Parameter der Behälter sowie des Behälterumfeldes erfasst werden. Eine Messgröße, welche einen Rückschluss auf die Entwicklung der technischen Barriere

zulässt, ist beispielsweise die Wasserstoffbildung an der Behälteroberfläche.

Ziele des geotechnischen Monitoring

Das geotechnische Monitoring wird in den geotechnischen Barrieren, d. h. im Versatz und in den Verschlussbauwerken, aber auch in den offenzuhaltenden Infrastrukturräumen umgesetzt. Weiterhin wird es in der geologischen Barriere im Nahbereich der Hohlräume angeordnet. Ziel ist es, wie oben bereits erwähnt, die Zustände und Zustandsänderungen vor dem Hintergrund der verschiedenen Funktionalitäten messtechnisch zu erfassen und mit den Annahmen zu vergleichen. Unter der Annahme, dass Salzgrus und Bentonit zum Einsatz kommen, ist das Monitoring den unterschiedlichen Funktionalitäten anzupassen. Je nach Versatzmaterial sind die Kompaktion (Salzgrus) und der Quelldruck (Bentonit) näher zu überwachen. Sie sind Indikatoren für die eigentliche Funktion der abdichtenden Wirkung der Versatzmaterialien und der Stützung des Wirtsgesteins zur Behinderung der weiteren Entwicklung der Auflockerungszonen. Näheres hierzu siehe Abschnitt 5.6. Den Verschlussbauwerken kommen ebenfalls in Abhängigkeit des Wirtsgesteins verschiedene Funktionalitäten zu. Generell müssen sie die Entstehung oder Weiterentwicklung der Auflockerungszonen (ALZ) und somit Umläufigkeiten weitgehend behindern. Im Fall eines Bentonitversatzes haben sie zusätzlich eine Widerlagerfunktion, um den Quelldruck des Bentonits aufzunehmen und in das Gebirge abzuleiten. Die wesentlichen Indikatoren sind die Spannungen normal zur Kontaktfläche Abschlussbauwerk / Gebirge und die Verschiebungen im Kontaktbereich (vgl. Stahlmann u. a. (2018)). Von hoher Bedeutung ist die Integrität der geologischen Barriere des Wirtsgesteins.

Während im kristallinen Hartgestein nur die mechanische Barriere als wirksam angesetzt werden kann, ist für die Wirtsgesteine Ton, Tonstein und Steinsalz im Wesentlichen die hydraulische Barrierewirkung zu erhalten. Infolge der offenzuhaltenden Hohlräume, aber auch einer kaum möglichen vollständigen Stützung im Bereich der Einlagerungskammern, tritt eine fortschreitende Degradation der Barrierewirkung ein. Die Entwicklung der dies verursachenden Auflockerungszonen ist damit zu erfassen und zu bewerten. Als Indikatoren sind hier im Wesentlichen die Hohlraumkonvergenzen und Verzerrungen im Nahbereich der Hohlräume und Einlagerungsstrecken zu nennen.

Für die Messungen im Bereich der Einlagerungsstrecken und damit den verschlossenen Grubenbereichen ist in den generischen Tiefenlagermo-

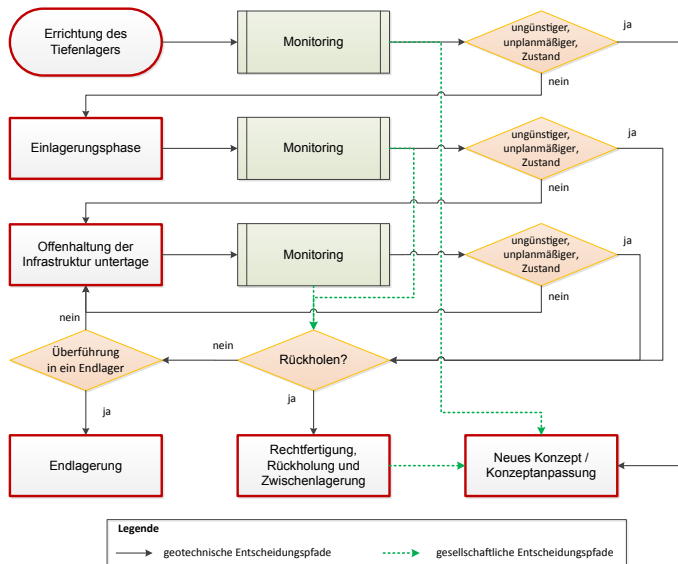


Abbildung 3.20: Ablaufplan und Entscheidungspfade für ein Monitoringprogramm in einem Tiefenlager.

dellen eine Monitoringsohle vorgesehen (s. Abschnitt 5.6), welche die Einlagerungsfelder über Bohrungen der Instrumentierung zugänglich macht. Art und Anzahl der Monitoringstrecken und Messbohrungen richtet sich nach den identifizierten Homogenbereichen des Gebirges, aber auch nach den Spannungs-Verformungszuständen im Gebirge. Ziel ist es, die Übertragbarkeit der messtechnisch gewonnenen Erkenntnisse auf andere Grubenbereiche zu gewährleisten.

Das Monitoring ist schon bei der Planung eines Tiefenlagers zu berücksichtigen vgl. Abbildung 3.20. Die Messkampagnen sind bereits mit Beginn der Auffahrungen der Schächte oder Rampen zu starten, um frühzeitig die geologischen Annahmen, die vorliegende Datengrundlage und das ingenieurtechnische Modell zu überprüfen. Die Interpretationen der zu erhebenden Daten dienen bereits zu diesem frühen Zeitpunkt dazu, die Entscheidung über die Umsetzung des Projekts oder aber auch dessen Abbruch zu treffen.

Liegen die Ergebnisse des Monitorings im erwarteten Bereich, kann der Prozess der Einlagerung der ENCON fortgesetzt werden. Wenn während der Einlagerung der Reststoffe ein ungünstiger, unplanmäßiger Zustand durch das Monitoring angezeigt wird, steht als Konsequenz daraus die

Entscheidung über eine Rückholung der eingelagerten ENCON an. Das muss durch die Monitoringergebnisse gerechtfertigt werden und führt zu einer Oberflächenlagerung der eingelagerten Reststoffe. Für die Entsorgung ist ein neues Konzept zu erstellen. An die Einlagerungsphase schließt eine Offenhaltungsphase an. In kriechfähigen Wirtsgesteinen wird ein ungünstiger Zustand nach einiger Zeit erreicht sein, da die Schädigung der Barriere, wie oben bereits erwähnt, weiter fortschreitet. Ergeben sich daraus Zweifel an einer in naher Zukunft noch ausreichenden Integrität der geologischen Barriere, ist die Entscheidung Rückholung / Überführung in ein Endlager kurzfristig unter Würdigung der entstehenden Konsequenzen zu treffen.

Unabhängig von den ingenieurwissenschaftlichen Entscheidungsgründen kann das Tiefenlagerprojekt in jeder Phase durch gesellschaftliche Entscheidungsprozesse abgebrochen werden. Auch eine derartig begründete Entscheidung zieht die bereits genannten Konsequenzen nach sich. Ein neues Konzept zur Entsorgung wird erforderlich. Nach der Rückholung müssen die Reststoffe erneut zwischengelagert werden. Genauso kann gesellschaftlich nach einer als ausreichend angesehenen Beobachtung der Entwicklungen im Tiefenlager die Überführung in ein Endlager entschieden werden.

Aufgrund dieses Vorgehens wird im Vergleich zu einem direkt umgesetzten wartungsfreien Endlager bei der Tiefenlagerung eine zusätzliche Entscheidungsmöglichkeit und Fehlerkorrekturmöglichkeit gewonnen. Fehlerhafte Entscheidungen im Tiefenlagerprojekt können erkannt und revidiert werden.

Durch die Vielzahl der ablaufenden Prozesse und den Prototypcharakter jedes Tiefenlagers ist das Monitoring im Tiefenlager eine Herausforderung. Zu berücksichtigen sind die thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Prozesse, die durch die Auffahrung des Tiefenlagerbergwerks und die eingelagerten hoch radioaktiven Reststoffe verursacht werden. Diese beeinflussen sich teilweise gegenseitig und zeigen damit die Komplexität des Vorhabens. Zu dieser technischen / naturwissenschaftlichen Komplexität kommt eine gesellschaftliche Komplexität, die durch unterschiedliche Akteure mit divergierenden Interessen geprägt ist.

3.6.3 Grenzen des Monitorings der technischen Barriere

Große Herausforderungen ergeben sich bei der Entwicklung eines Konzepts zur Überwachung der technischen Barriere daraus, dass die Behälter im Tiefenlager von der geotechnischen sowie der geologischen Barriere

re umschlossen sind. Die Behälter sind nach der Verfüllung der Einlagerungsbereiche nicht mehr zugänglich. Durchörterungen der umgebenden geotechnischen Barriere, beispielsweise durch Kabel, sind zu vermeiden.

Inhomogenitäten in der geotechnischen Barriere, wie sie beispielsweise durch Versorgungsleitungen für Messsysteme, aber auch durch diese selber entstehen, stellen potentielle Wasserwegsamkeiten dar und können somit zu einer Beeinträchtigung der Barrierewirkung führen. Somit ist die Anwendungsmöglichkeit kabelgebundener Sensorsysteme zur Überwachung beladener Behälter stark eingeschränkt. Hieraus ergeben sich erhebliche Restriktionen bei den für das Monitoring am Behälter einsetzbaren Messsystemen, da diese zwingend über eine Energieversorgung und ein System zur kabellosen Übertragung der aufgenommenen Messdaten verfügen müssen.

Einschränkungen für das Monitoring können sich aus vielfältigen Gründen ergeben. Technischen Restriktionen sowie gesellschaftliche, finanzielle und politische Randbedingungen beschränken den Bereich in dem Monitoring sinnvoll und umsetzbar ist. Nachfolgend werden ausschließlich technische Aspekte betrachtet, welche kontextabhängig die Grenzen eines sinnvollen und nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik umsetzbaren Monitoringkonzepts definieren.

Für die technische Umsetzbarkeit eines Monitoringkonzepts, insbesondere beim Monitoring der technischen Barriere, ergeben sich aus einer Vielzahl von Gründen Limitierungen. An erster Stelle stehen die rein technischen Restriktionen, welche beispielsweise daraus resultieren, dass das Messsystem selbst einen negativen Einfluss auf das Barrierensystem besitzen kann. So können beispielsweise elektrochemische Messverfahren zur Bestimmung des Korrosionsfortschrittes keine Anwendung finden, da zur Durchführung dieser Messungen zwingend ein Elektrolyt erforderlich ist. Dieser würde bei langfristiger Einwirkung auf den Behälter selbst den Korrosionsprozess unterstützen und somit die langfristige Sicherheit des Behälters reduzieren. Aber auch durch die Monitoringstrategie bedingte, systematische Gründe können dazu führen, dass ein Monitoringkonzept unter den standortspezifischen Randbedingungen nicht oder nicht in dem gewünschten Umfang umsetzbar ist.

Die Frage nach den Grenzen des Monitorings lässt sich also nicht pauschal beantworten. Vielmehr ist die Antwort auf diese Frage von den jeweiligen Randbedingungen des Einlagerungs- und Monitoringkonzepts abhängig. Die Entscheidung, zu welchem Zweck das Monitoring betrieben werden soll, stellt dabei den Aspekt dar, welcher den größten Einfluss auf die Umsetzbarkeit eines Monitorings der technischen Barriere besitzt. Hieraus ergeben sich sehr unterschiedliche Anforderungen an das umzu-

setzende Monitoringsystem, beispielsweise an die Art, Menge und Qualität der zu erfassenden Daten. Da sich die Grenzen des sinnvollen Monitorings hierdurch erheblich verschieben können, stellt dieser Aspekt eine der Haupteingangsgrößen bei der Betrachtung der Möglichkeiten der Überwachung der Behälter dar. Die bezüglich Art, Menge und Qualität der zu erfassenden Daten anspruchsvollste Anwendung des technischen Monitorings ist die Erfassung der Entwicklung von (Teil-)Systemen der technischen Barriere sowie der Wechselwirkungen der technischen Barriere mit den umgebenden Barrierensystem unter Tiefenlagerbedingungen. Ziel dieses Monitorings ist es, die Entwicklung der Systeme mit den prognostizierten Szenarien vergleichen zu können, um potentielle Abweichungen möglichst frühzeitig zu identifizieren und gegebenenfalls die Auswirkungen dieser Abweichungen von der ursprünglichen Konzeption des Lagers bewerten, beziehungsweise beurteilen zu können.

Aus der Forderung nach Rückhol- bzw. Bergbarkeit der Behälter resultiert ein weiterer Grund, der eine Erfassung von Zustandsgrößen der technischen Barriere im Rahmen des Monitorings erforderlich macht. Um bei einer potentiellen Rückholung der Behälter aus dem Tiefenlager Gefährdungen für Mensch und Umwelt vermeiden zu können, muss bei ihrer Vorbereitung eine Vielzahl von Aspekten berücksichtigt werden. An erster Stelle steht hier die Sicherheit von Personal und Zivilbevölkerung. Es ist offensichtlich, dass bereits der Zeitaufwand zur Rückholung intakter Behälter durch die zusätzlich erforderlichen Schritte zur Inspektion und Reinigung der Behälter vor der Auslagerung, über dem Zeitbedarf für die Einlagerung liegt. Alle Tätigkeiten, die zur Optimierung der Handhabbarkeit potentiell beschädigter Behälter durchgeführt werden, erhöhen den Zeitaufwand zur Rückholung der Behälter erheblich. Die Bandbreite potentiell erforderlicher Arbeiten reicht hierbei von der Ertüchtigung der behälterseitigen Lastanschlagpunkte über die Anbringung von zusätzlichen Abschirmungen bis hin zu einer Umverpackung der Behälter in Transportverpackungen. Auf der anderen Seite nimmt der Aufwand zur Aufrechterhaltung eines betriebssicheren Zustandes in einem wieder aufgefahrenen Lagerbergwerk, in Abhängigkeit vom Wirtsgestein, teils erheblich mit der Zeitdauer der erforderlichen Offenhaltung zu. Um die zur Rückholung der einzelnen Behälter erforderlichen Maßnahmen abschätzen zu können, und um zeitraubende Arbeiten zur Behälterertüchtigung zu vermeiden, erfordert die Vorbereitung einer Rückholung eine möglichst genaue Kenntnis über den Zustand aller eingelagerten Behälter. Elementar für die Rückholung ist die Kenntnis über die Dichtheit der Behälter. Zusätzlich ist ein genaues Wissen über die Temperatur der einzelnen Behälter, sowie ihres Umfeldes, als Eingangsgröße für die Planung der Behäl-

terrückholung erforderlich. Anhand dieser Temperaturen kann die im Gestein eingespeicherte Wärmemenge abgeschätzt werden, welche vor der Rückholung der Behälter abgeführt werden muss, um einen Aufenthalt von Personen in den Einlagerungsbereichen zu ermöglichen. Auch der Korrosionszustand der Behälter, und hier insbesondere der Zustand der Last tragenden Strukturelemente, ist ein wichtiges Kriterium für die Planung einer Rückholung.

Die Erfassung des Korrosionszustandes stellt ein gutes Beispiel zur Darstellung der zu beachtenden Restriktionen beim Monitoring der technischen Barriere dar. Die direkte Erfassung von Korrosionsvorgängen an den Behältern, beispielsweise mittels elektrochemischer Messungen, ist nach dem heutigen Stand der Technik mit einem erheblichen Eingriff in das Barrierensystem verbunden. Somit ist davon auszugehen, dass der sicherheitstechnische Wert des durch diese Messungen erzielbaren Erkenntniszuwachses geringer zu bewerten ist als der potentielle langfristige Sicherheitsverlust durch die hierfür erforderlichen Eingriffe in das Barrierensystem. Die Beobachtung der Entwicklung des weiteren Behälterumfeldes ermöglicht jedoch Rückschlüsse auf ablaufende Korrosionsvorgänge an den Behältern. Beispielsweise kann der bei der Korrosion entstehende Wasserstoff detektiert und als Indikator für die Geschwindigkeit der Korrosionsprozesse genutzt werden. Somit kann beim Monitoring mit dem Ziel der planbaren Rückholbarkeit gegebenenfalls auf die direkte Bestimmung des Korrosionsfortschrittes an den Lagerbehältern verzichtet werden. Stattdessen können, als Ergänzung zur Überwachung des Lagerumfeldes bezüglich Wasserzutritt und Wasserstofffreisetzung, Korrosionsmessungen an unbeladenen Dummy-Behältern erfolgen, welche unter vergleichbaren Bedingungen wie die eigentlichen Lagerbehälter, beispielsweise am Ende der Monitoring Strecken, eingelagert werden. Diese Versuchsbehälter ermöglichen aufgrund ihres nicht vorhandenen radiotoxischen Gefährdungspotentials eine wesentlich umfangreichere Instrumentierung, nicht nur zur Bestimmung von Korrosionsraten, und können gegebenenfalls bereits vor einer Rückholentscheidung freigelegt und weiterführend untersucht werden. Aus der Zusammenführung der Daten dieser Versuchsbehälter und dem Abgleich der Daten des Umgebungsmonitorings der realen Lagerbehälter können für die Planung der Rückholung ausreichend genaue Aussagen zum Korrosionszustand der eingelagerten Behälter getroffen werden.

An den beiden Beispielen wird ersichtlich, dass aus dem Zweck des Monitorings sehr unterschiedliche Anforderungen an den Umfang und die Qualität der zu ermittelnden Daten resultieren. Auch die Positionen an denen diese Messwerte erfasst werden müssen, unterscheiden sich. Die

für die Planung einer sicheren Rückholung elementaren Daten lassen sich bereits durch eine oder wenige Messungen der Dichtheit (Druckverlust im Behälter), sowie der Temperatur im Behälterumfeld ermitteln und werden durch weitere Messwerte des geologischen und geotechnischen Monitorings ergänzt. Im Gegensatz hierzu erfordert das Monitoring der zeitlichen Entwicklung der Behälter im Lagerumfeld zwingend die Erfassung von einer Vielzahl von Messwerten im direkten Behälterumfeld und gegebenenfalls auch an der Behälteroberfläche, um valide Aussagen treffen zu können. Je mehr und je häufiger Messwerte erfasst und demnach auch übermittelt werden müssen, desto höher werden die Anforderungen an die Energieeffizienz der Messsysteme beziehungsweise an deren Energieversorgung. Dies liegt darin begründet, dass jede Erfassung, Verarbeitung und insbesondere auch die Übermittlung eines Messwertes eine bestimmte Energiemenge benötigt. Unter Tiefenlagerungsbedingungen stellt die Energieversorgung ein zentrales Problem dar. Sie muss durch die Verwendung von ausreichend leistungsfähigen, mit eingelagerten Energiespeichern, drahtloser Energieübertragung oder Methoden, wie dem Energy Harvesting, direkt gewonnen werden. Die limitierten Energiemengen ermöglichen nur die Erfassung und Übertragung weniger Messwerte mit entsprechend großen zeitlichen Abständen. Eine kabellose Energieübertragung ist nur unter bestimmten Voraussetzungen umsetzbar. Hierzu müssen mehrere Randbedingungen eingehalten werden, wodurch sich erhebliche Restriktionen ergeben, welche die Einsatzgrenzen dieser Technik limitieren. Dabei steht meist der Komplexitätsgrad diametral dem Robustheitsgrad gegenüber.

Für alle Sensoren die an der Schnittstelle zwischen Behälter und geotechnischer Barriere positioniert werden sollen gilt, dass diese dort zwangsläufig denselben Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind wie die Behälter. Demnach ist auch an den Messsystemen mit einer Degradation, beispielsweise in Folge von Korrosionsvorgängen zu rechnen, wodurch die Lebensdauer dieser Systeme, unabhängig von der Möglichkeit der limitierten Energieversorgung, begrenzt wird. Zusätzlich darf von dem Messsystem keine Schädigung der Barrieren induziert werden, weshalb viele Messverfahren für den Einsatz an beladenen Behältern nicht geeignet sind. Aus diesem Grund ist auch der Einsatz elektrochemischer Energiespeicher, welche zumeist stark reaktive Substanzen enthalten, an dieser Stelle als sehr kritisch zu betrachten.

Besser geeignet sind Ansätze wie das Energy Harvesting. Dabei findet aus der zeitlichen oder räumlichen Veränderung physikalischer Zustandsgrößen, wie Temperatur oder Druck, die Gewinnung elektrischer Energie statt. Um hiermit eine für die Versorgung der Sensoren und der er-

forderlichen Technik zur Signalübertragung ausreichende Energiemenge gewinnen zu können, ist entweder eine Zustandsveränderung oder ein Zustandsgradient erforderlich. An der Behälteroberfläche herrschen weitestgehend stationäre Zustände, weshalb für das Energy Harvesting nur die Nutzung von Zustandsgrößengradienten in Frage kommt. Die nutzbare Energiemenge richtet sich dabei nach der Größe des Gradienten sowie der Größe des Energiewandlers. Um ausreichend elektrische Energie gewinnen zu können, ist voraussichtlich der Einsatz von verhältnismäßig großen Energiewandlern notwendig.

Eine weitere Form der kabellosen Energieversorgung stellt die Energieübertragung in Form elektromagnetischer Wellen, über eine Art Richtfunkstrecke, dar. Genau genommen handelt es sich auch dabei um ein Energy Harvesting System. Bei diesem Verfahren gibt vereinfacht dargestellt, die Größe der Antennen den Frequenzbereich vor, in dem eine Energieübertragung erfolgen kann. Die Energieübertragung sollte für den Einsatz im Tiefenlager bei einer vergleichsweise hohen Frequenz erfolgen. Gerade diese Frequenzen werden allerdings von festen Materialien wie dem umgebenden Verfüllmaterial, insbesondere, wenn dieses wasserhaltig ist, sehr stark abgeschirmt. Hieraus folgt, dass die mögliche Entfernung zwischen Sender und Empfänger, in Abhängigkeit von dem dazwischen befindlichen Material, begrenzt ist. Ob mit dieser Technik in einem verfüllten Tiefenlager die geotechnischen Barriere überbrückt werden kann, ist unter anderem von der spezifischen Zusammensetzung des Verfüllmaterials abhängig. Die gesamte Entfernung zwischen Monitoringsohle und Lagerbehälter kann mit dieser Technik allerdings nicht überbrückt werden. Somit müssten von der Monitoringsohle aus Bohrungen bis an die geotechnische Barriere heran abgeteuft werden, in denen die entsprechende Sendetechnik positioniert werden kann. Durch die begrenzte Reichweite der Übertragung können von dem in der Bohrung platzierten Sender voraussichtlich nur wenige Sensoren versorgt werden. Hierdurch folgt, dass die Gesamtzahl der Sensoren eingeschränkt ist.

Es ergibt sich für das Monitoring von Prozessen an der Behälteroberfläche die Problematik, dass dieses mit einer begrenzten Anzahl von Sensoren erfolgen muss und dass viele Messverfahren nicht zum Einsatz kommen können, da diese einen negativen Einfluss auf die Barrieren besitzen. Bei den verbleibenden Sensoren muss aufgrund der Randbedingungen der Messung davon ausgegangen werden, dass diese einer starken Degradation unterliegen, sodass bereits nach kurzen Zeiträumen mit dem Versagen einzelner Messsysteme zu rechnen ist. Insbesondere beim Monitoring der Schnittstelle zwischen Behälter und Verfüllmaterial ist zu beachten, dass es nach dem heutigen Stand der Technik nur schwer möglich ist über ei-

nen längeren Zeitraum eine ausreichend sichere Datenbasis zu gewinnen, die eine statistische Absicherung der Messergebnisse zulassen würden.

Auch wenn die ermittelten Daten nicht ausreichend statistisch abgesichert und gegebenenfalls fehlerbehaftet sind, können sie in Kombination mit weiteren Messwerten, welche beispielsweise im Rahmen des Monitorings der geologischen und geotechnischen Barriere und der Überwachung von Dummy Behältern erfasst werden, dennoch einen wichtigen Beitrag in einem Monitoringkonzept leisten. Die Gefahr, dass durch Maßnahmen zum Monitoring die Sicherheit des Tiefenlagers reduziert wird, bleibt aber bestehen.

Grenzen des Monitorings der geologischen und geotechnischen Barriere

Klärung der Fragestellung. Geotechnisches Monitoring kann nicht ohne eine konkrete Fragestellung sinnvoll betrieben werden. In einem Tiefenlager ist dies die Frage nach der Integrität der Barrieren. Bei der Erstellung eines Monitoringkonzepts müssen die Fragen, wann, was, wo, wie und warum gemessen wird, geklärt werden. Dabei nicht berücksichtigte Bereiche können nach dem Start eines Monitoringprogramms in einem Tiefenlager nur eingeschränkt angepasst werden, da die ersten Messungen wichtige Referenzmessungen darstellen, an denen die Entwicklung des Tiefenlagers kalibriert wird. Fehlen diese Messungen, wird die Interpretation der gewonnenen Daten erschwert bis unmöglich.

Integrität der Messdaten und ihre Auswertung / Interpretation / Ausfall der Messkette. Die Integrität der gewonnenen Daten ist eine wesentliche Voraussetzung für ihre Nutzung als Grundlage für die Entscheidung über die Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager. Das umfasst sowohl die Qualität als auch die Quantität der gemessenen Daten.

Integre Daten über einen langen Zeitraum zu erfassen, erfordert eine zuverlässige Messkette. Relevanter Ausgangspunkt ist der Stand von Technik zum Zeitpunkt der Erstellung des Tiefenlagers. Derzeit ist eine autarke und zuverlässige Datenübertragung sowie Stromversorgung über den angestrebten Zeitraum des Monitorings nicht Stand von Wissenschaft und Technik, an dieser Thematik wird allerdings geforscht, so dass Lösungen in den nächsten Jahren zu erwarten sind. Wesentlich ist auch die Standzeit der Messgeber. Nach den bisherigen Erfahrungen liegen die Standzeiten von Gebern im Bereich weniger Jahre oder im besten Fall Jahrzehnte. Wird im Fall des Ausfalls von Messgebern ein Worst-Case-Szenario unterstellt, wie es immer wieder diskutiert wird, ist die

Rückholung erforderlich. Grund dafür ist, dass dann von einer unplanmäßigen negativen Entwicklung des Tiefenlagers auszugehen ist. Aus diesem Grund ist daher unter Berücksichtigung des heutigen Standes von Wissenschaft und Technik eine Wartung oder ein Austausch von Gebern erforderlich. Damit ergibt sich das Erfordernis, dass während der Offenhaltungsphase eine Instrumentierung in offenen Bohrungen mit Kabelführungen vorliegt. Die Kabelführung ermöglicht außerdem den Verzicht auf kabellose Funk-Technologie und einer autarken Stromversorgung.

Um systematische Messfehler quantifizieren zu können, ist der Einsatz redundanter und diverser Messsysteme empfehlenswert. Die Quantität der Daten wird im Wesentlichen durch die Anzahl und die Auslesefrequenz der Messgeber bestimmt. Eine zu geringe zeitliche Auflösung kann bedeuten, dass manche Ereignisse nicht wahrgenommen werden, eine zu hohe, dass die Datenmenge nicht beherrschbar ist. Hier ist anhand der Fragestellung ein Kompromiss zu finden.

Über den Zeitraum des Monitoringprogramms muss das Datenmanagement funktionieren. Dafür müssen die gewonnenen Daten in einem Format gespeichert und archiviert werden, das eine Lesbarkeit der Daten über den gesamten Zeitraum der Aufzeichnung und darüber hinaus gewährleistet. Die Realisierung dieser Bedingung erfordert ausreichend Speicherplatz und die Portierbarkeit der Daten zu potentiell aktuelleren Datenformaten.

Auswertung und Interpretation der Messdaten. Die Auswertung und Interpretation der Messergebnisse stellen die Grundlage für die Entscheidung über Endlagerung / Rückholung dar. Deswegen kommt ihnen eine besondere Bedeutung zu. Falsche Interpretationen können zur falschen Annahme führen, dass das Tiefenlager sicher ist und in ein Endlager überführt werden kann oder auch zu der falschen Begründung einer notwendig erscheinenden Rückholung.

Die Interpretation der Messdaten aus dem Monitoringprogramm erfordert viel Erfahrung und muss von ausgebildetem Fachpersonal durchgeführt werden. Um dieses über den Beobachtungszeitraum bereit zu stellen, besteht die Notwendigkeit, eine Institution mit entsprechenden finanziellen Mitteln und Know-how auszustatten. Die Informationsweitergabe muss dabei über mehrere Generationen hinaus garantiert werden. Außerdem ist bei der Interpretation der Daten der aktuelle Stand der Technik der Auswertung zu berücksichtigen. Dieser kann aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse verbessert werden, so dass neue Methoden zur Modellbildung angewendet werden können. Die Interpretationen

sollten zusätzlich von der wissenschaftlichen Gesellschaft begutachtet werden können, um anhand von „peer-reviews“ eine hohe Qualität zu gewährleisten.

Die Auswertung der Daten birgt immer das Risiko einer Fehlinterpretation. Um dieses Risiko zu minimieren, müssen über den gesamten Messzeitraum, wie bereits erläutert, integrale Daten verfügbar sein. Monitoring führt immer zu einer Schädigung der Barrieren. Das gilt insbesondere, wenn aufgrund des derzeitigen Standes der Technik nicht auf autarke Monitoringsysteme zurückgegriffen werden kann.

Wie viele Bohrungen genau für die Beobachtung der geotechnischen Barriere erforderlich sind, kann jedoch erst nach der Erprobung der Herstellungsmethoden der geotechnischen Barriere geklärt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, wie groß die Herstellungstoleranzen sind und wie groß z.B. bei Bentonitbarrieren die Abweichungen der Materialeigenschaften sind. Zusätzlich ist die Interaktion der geotechnischen Barriere mit der geologischen Barriere zu bewerten.

Die Schädigung der Barrieren sollte trotzdem so gering wie möglich gehalten werden, was eine Reduktion der Instrumentierungen auf das für die Fragestellung erforderliche Maß erfordert. So sind Mehrfachinstrumentierungen kritisch auf ihre Sinnhaftigkeit zu überprüfen, auch wenn eine gewisse Redundanz erstrebenswert ist.

3.6.4 Monitoring der technischen Barriere (Konzept zum Behältermonitoring des IW)

Der Begriff Monitoring beschreibt im Allgemeinen die systematische Erfassung, Beobachtung und Überwachung von Vorgängen oder Prozessen mit Hilfe von technologischen Systemen. Ziel dabei ist es, durch zerstörungsfreie Messungen Daten zu gewinnen anhand derer die Entwicklung eines Systems beobachtet werden kann, sodass ein rechtzeitiger Eingriff zur Verhinderung eines Funktionsversagens möglich wird und gegebenenfalls Aussagen über seine weitere Entwicklung abgeleitet werden können.

Das Behältermonitoring bei der Tiefenlagerung ist während der Betriebsphase und einer zusätzlichen Beobachtungsphase vor der Überführung des Lagerbergwerks in ein Endlager zwingend erforderlich. Bei der Auslegung des Tiefenlagers ist die potentielle Rückholung bei entsprechenden durch das Monitoring bedingten Indikationen zu berücksichtigen. Zur zielgerichteten Durchführung des Monitorings ist es daher zwingend erforderlich, dass Teile des Bergwerks auch nach der Einlagerungsphase funktionsfähig und zugänglich bleiben.

Sämtliche verwendeten Messsysteme müssen entweder eine Langzeitstabilität oder nach dem heutigen Stand der Technik eine Möglichkeit zur Wartung aller Elemente der Messkette aufweisen. Letzteres kann im generischen Tiefenlagerkonzept für einen Teil der Sensorsysteme durch Bohrungen, die von der Monitoringstrecke in die Nähe der Einlagerungsbehälter abgeteuft werden, umgesetzt werden.

Das Ziel des Monitorings ist es, die Integrität sämtlicher Einlagerungsbehälter sicherzustellen und beim Auftreten von Schäden als Indikator für die Rückholung des eingelagerten Inventars zu dienen. Eingelagerte Behälter, deren strukturelle Unversehrtheit und Dichtheit nicht gewährleistet ist, stellen bei Handhabungsvorgängen im Rahmen der Rückholung ein großes Sicherheitsrisiko für Personal und Umwelt dar. Auch konstruktive und werkstoffwissenschaftliche Details der Lagerbehälter spielen bei der Auslegung des Monitoringsystems eine große Rolle, da diese sowohl die Wechselwirkungen mit dem Umfeld als auch die Randbedingungen der Rückholung beeinflussen.

Derzeit stellt der eingelagerte Behälter eine Black-Box dar, dessen Status im Tiefenlager nicht erfasst werden kann. Nach dem heutigen Stand der Technik wäre es aber denkbar einige Parameter des Behälters zu überwachen. Hierzu könnten beispielsweise die Wärmeentwicklung und die Korrosionsprodukte als passive Indikatoren für den Ist-Zustand des Behälters durch die geotechnische Barriere hindurch detektiert werden. Aufbauend auf den recherchierten Daten wurden für das Monitoring der technischen Barriere die Eigenschaften identifiziert, welche evtl. Auswirkungen auf die Sicherheit des Behälters besitzen. Anschließend wurden geeignete Sensoren für das Monitoring der technischen Barriere im Tiefenlager recherchiert und beschrieben. Im Rahmen der Arbeiten des AP 6.5 wurden die folgenden Zustandsgrößen der Behälter für die Überwachung der technischen Barriere identifiziert:

- Dichtheit
- Korrosionsfortschritt an der Behälteroberfläche
- Temperaturentwicklung
- Position und Lage bzw. Lageveränderungen
- Radiologie

Führende Kriterien sind die Dichtheit des Behälters, seine Wärmeentwicklung sowie die Radiologie. Diese werden nachfolgend genauer erläutert. Die Dichtheit des Behälters ist von der Korrosion des Behälterkörpers sowie der Integrität der Verschlussysteme abhängig. Die Radiologie

wird vom Behälterinventar und dem Abschirmverhalten der Behälterwerkstoffe bestimmt. Beim Behältermonitoring ergibt sich durch die im Tiefenlager nicht gegebene Zugänglichkeit die Herausforderung, dass viele der Zustandsgrößen, welche einen Rückschluss auf die Entwicklung der technischen Barriere zulassen würden, nicht direkt messbar sind. Bei der Auswahl von Messgrößen für das Monitoring ergibt sich somit oft ein Zielkonflikt zwischen der Relevanz und der Erfassbarkeit der Zustandsgröße im Tiefenlager. Um diesen Zielkonflikt teilweise auflösen zu können, wurde der Ansatz verfolgt die Prozesse, die zu einer Veränderung der Zustandsgröße führen sowie die Auswirkungen, die eine Veränderung der Zustandsgröße auf Ihr Umfeld induziert, zu identifizieren und zu beschreiben.

Die Erarbeitung potentieller Monitoringkonzepte wird in der Folge exemplarisch am Beispiel der Temperaturentwicklung sowie der Behälterkorrosion erörtert. Eine Detektion von Korrosionsvorgängen an den Lagerbehältern kann im Tiefenlager nicht direkt erfolgen, sondern lediglich anhand der Beobachtung von Einflussgrößen und durch die Überwachung resultierender Wechselwirkungen (wie beispielsweise die Wasserstofffreisetzung in Folge eines Korrosionsvorganges) mit dem Behälterumfeld detektiert werden. Eine Möglichkeit stellt hier die Messung der Entwicklung der Feuchtigkeitssättigung im direkten Behälterumfeld dar. Anhand dieser können Rückschlüsse auf die korrosiven Vorgänge an den Behältern gezogen werden. Alternativ lassen sich direkte Messungen an einem unter vergleichbaren Umweltbedingungen eingelagerten Dummy-Behälter durchführen, bei dem die Zugänglichkeit im Gegensatz zum realen Behälter gegeben wäre. Diese Daten müssen analysiert und bewertet werden. Die Herausforderung dabei besteht in der Identifikation und quantitativen Erfassung der relevanten Einfluss- und Messgrößen. Des Weiteren müssen geeignete Sensorsysteme zur Erfassung der Messwerte zur Verfügung stehen, welche regelmäßig gewartet werden können oder robust und langzeitstabil sind.

Anders gestaltet sich die Situation beim Monitoring der Temperaturentwicklung der Behälter im Endlager. Der Behälter stellt eine Wärmequelle dar, die das direkte Umfeld erheblich erwärmt. Hier ist die Überwachung der Temperatur an der Behälteroberfläche genauso denkbar, wie das Messen der Temperatur in der näheren Umgebung bis hin zur Messungen der Temperatur außerhalb der geotechnischen Barriere, welche die Interpolation der Behältertemperatur ermöglichen. Im letzteren Fall muss die Wärmeleitung aller Komponenten zwischen Behälter und Messtechnik bekannt sein, damit valide Rückschlüsse auf die Temperatur am bzw. im Behälter möglich werden.

Wenn es möglich ist diese Indikatoren messtechnisch zu erfassen, können Rückschlüsse auf die Entwicklung der relevanten Zustandsgrößen getroffen werden. Ein Beispiel für einen solchen Indikator ist die Feuchtigkeitssättigung an der Behälteroberfläche bei einem Tiefenlager im Steinsalz. Solange kein Feuchtigkeitstransfer zu den Behältern erfolgt, kommt der Korrosionsangriff an diesen mittelfristig zum Erliegen. In diesem Fall ist der Rückschluss aus den messtechnischen Ergebnissen lediglich im Salzgestein möglich und nicht auf die Wirtsgesteine Ton / Tonstein oder Kristallin übertragbar. Im Salzgestein kann Korrosion erst dann auftreten, wenn Feuchtigkeit im Versatzmaterial vorhanden ist. Im Fall der beiden anderen Wirtsgesteine ist prinzipiell von einem Wasserzutritt auszugehen. Daher kann Fortschritt der Degradation der Behälteroberfläche nur über eine direkte Messung der Dicke der Korrosionsschicht, beispielsweise mittels einer Wirbelstrommessung, ermittelt werden. Wenn diese direkte Messung auf Grund der eingeschränkten Zugänglichkeit der Behälter im Tiefenlager nicht möglich ist, können gegebenenfalls aus der Messung von Korrosionsprodukten wie Wasserstoff Rückschlüsse auf den Behälterzustand ermöglicht werden.

Eine weitere mögliche Messgröße zum Monitoring der technischen Barriere stellt der Behälterinnendruck dar. Bei den heute zur Zwischenlagerung eingesetzten Transport- und Lagerbehältern wird bereits seit Jahren ein Druckschalter zur Überwachung des Innendrucks der Behälter im Zwischenlager eingesetzt. Für das Behältermonitoring im Endlager wurde die Messgröße Behälterinnendruck innerhalb der Bearbeitung von ENTRIA als nur wenig geeignet identifiziert. Ein Integritätsverlust des Behälters kann anhand des Behälterinnendrucks erst dann erkannt werden kann, wenn eine der Behälterbarrieren bereits undicht geworden ist. Eine Intervention ist zu diesem Zeitpunkt nicht mehr gefahrlos möglich, da in Folge mechanischer Belastungen bei einer Rückholung mit einer Freisetzung von Radionukliden zu rechnen ist. Während sich diese Messgröße also nicht zur Beschreibung der Behälterentwicklung eignet, ist sie für die Planung einer potentiellen Rückholung aus anderen Gründen elementar. Solange über den Behälterinnendruck die Integrität der Behälter nachgewiesen werden kann, können diese vergleichsweise gefahrlos rückgeholt werden. Sollte dieser Nachweis nicht möglich sein, müssen alle Vorgänge zur Rückholung der betroffenen Behälter solange fernhantiert erfolgen bis die Integrität des Gebindes, beispielsweise durch einen Overpack, wieder gewährleistet ist.

Eine der größten Herausforderungen beim Monitoring der technischen Barriere stellt die Signalübertragung durch die verschlossene geotechnische Barriere dar. Wenn an der Anforderung der Unversehrtheit der

geotechnischen Barriere vollumfänglich festgehalten wird, kann es keine Bohrungen für die Durchführung von Kabeln zur Signal- sowie Energieübertragung geben. So müssen zwingend Konzepte zur Versorgung der direkt am Behälter platzierten Sensoren mit Energie erarbeitet und mögliche Energiequellen erforscht werden. Alternativ wären hier auch vollmechanische Schalter denkbar, welche ereignisbasiert nur ein einmaliges Signal erzeugen. Diese würden bei Aktivierung ihre potentielle Energie in elektrische oder akustische Signale wandeln. Allerdings birgt diese Art des Monitorings die Gefahr, dass das einmalige Signal im Umgebungspegel untergeht oder die Mechanik nach vielen Jahren versagt und zu einem späteren Zeitpunkt immer noch von einer intakten Sensorik ausgegangen wird. Des Weiteren können Sensoren außerhalb der geotechnischen Barriere platziert werden, welche mit nur geringen Auswirkungen auf die Wirksamkeit der Barriere durch Bohrungen von der Monitoringsohle gewartet und mit Energie versorgt werden können.

Rückholbarkeit setzt die sichere Handhabbarkeit und die damit verbundene strukturelle Unversehrtheit der Behälter voraus. Das Monitoring der technischen Barriere ermöglicht die Validierung der Integrität der Behälter. Die Auswahl geeigneter Messgrößen muss anhand ihrer Relevanz und ihrer technischen Erfassbarkeit erfolgen. Eine weitere Herausforderung stellt die Datenübertragung im Tiefenlager, sowie die Energieversorgung der Messsysteme dar. Sollten Abweichungen vom Sollzustand des Behälters erkannt werden, müssen Interventions- bzw. Eingriffsmöglichkeit gegeben sein.

3.6.5 Monitoring der geotechnischen und geologischen Barrieren (Monitoringkonzept des IGB)

Unter Berücksichtigung der oben genannten Ziele und Grenzen des Monitorings wird an dieser Stelle das vom IGB-TUBS entwickelte Monitoringkonzept für ein generisches Tiefenlager dargestellt. Eine nähere Erläuterung der Grundlagen des generischen Tiefenlagers sowie der Entwicklung der Normalszenarien finden sich im disziplinären Teil 5.6 und im Arbeitsbericht „Normalszenarien und Monitoringkonzepte für Tiefenlager mit der Option Rückholung“ (Stahlmann u. a., 2018). Das Monitoringkonzept basiert auf einem Normalszenario, das die wahrscheinlichste Entwicklung eines Tiefenlagers beschreibt. Die Unterschiedlichkeit der betrachteten Wirtsgesteine Steinsalz, Ton, Tonstein und kristallines Hartgestein erfordert die Entwicklung eines Normalszenarios für jedes Wirtsgestein. Darauf aufbauend kann jeweils ein wirtsgesteinsabhängiges Monitoringkonzept erstellt werden.

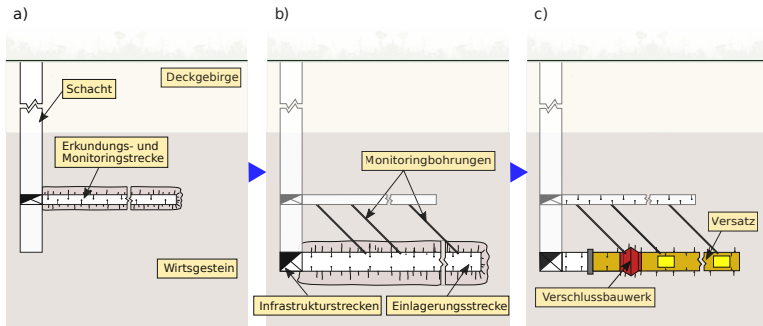


Abbildung 3.21: Bereiche exponierter Zustandsänderungen unter Berücksichtigung der Bauphasen des Tiefenlagerprojekts.

Die Entwicklung eines Normalszenarios bedarf der Kenntnis über die im Tiefenlager ablaufenden Prozesse und der Parameter, die diese Prozesse beschreiben. Beispielsweise lässt sich die Wärmeentwicklung in einem Tiefenlager über den Parameter „Temperatur“ festhalten. Vor der Definition der verschiedenen messbaren Parameter müssen die unterschiedlichen Bereiche festgelegt werden, in denen sich diese Parameter verändern. Abbildung 3.21 zeigt die Bereiche für ein Tiefenlager: Infrastrukturbereich, Verschlussbauwerk und Einlagerungsstrecken. Parameterveränderungen im angrenzenden Wirtsgestein sind in allen drei Bereichen zu berücksichtigen. Im Bereich des Verschlussbauwerks sind zusätzlich das Verschlussbauwerk, bestehend aus Abdichtungselement und Widerlager, und im Bereich der Einlagerungsstrecke der Versatz zu betrachten.

Des Weiteren ist es erforderlich, den Betrachtungszeitraum, in dem die Parameterveränderungen beobachtet werden sollen, einzugrenzen. Er beginnt mit der Auffahrung des Tiefenlagers und dauert über die Einlagerung der radioaktiven Reststoffe an und endet mit dem Verschluss des Tiefenlagers, bzw. der Rückholung der radioaktiven Reststoffe. Die Dauer der Beobachtungsphase, die nach der Einlagerung beginnt, ist variabel, da sie vom jeweiligen Wirtsgestein und dem speziellen Tiefenlagerkonzept abhängt.

Parameter für die Beobachtung der Entwicklung des generischen Tiefenlagers. Die Parameter, die über die Entwicklung des Tiefenlagers Aufschluss geben, sind im disziplinären Teil dieses Berichts (siehe hierzu Kapitel 5.6) und im Arbeitsbericht „Normalszenarien und Monitoring-

konzepte für Tiefenlager mit der Option Rückholung“ (Stahlmann u. a., 2018) näher erläutert.

In jedem Wirtsgestein ist die von den Reststoffen ausgehende Wärme relevant. Sie sollte an verschiedenen Orten gemessen werden, da sie einen Einfluss auf alle mechanischen und hydraulischen Parameter hat und auch chemische Prozesse beeinflusst.

In Steinsalz sind aufgrund des Kriechvermögens die Konvergenzen der offenen und der geschlossenen Hohlräume relevant. Kenntnisse zum Spannungsniveau sind wichtig, um die Wirkung des Verschlussbauwerks auf die Spannungsverteilung im Wirtsgestein nachweisen zu können. In den verschlossenen Einlagerungsstrecken ist außerdem die Porosität des Salzgruses ein entscheidender Faktor hinsichtlich der abdichtenden Funktion des Versatzes.

In Ton und Tonstein stimmen die zu bestimmenden Faktoren teilweise überein. Der Quelldruck des Versatzes ist zu bestimmen, damit ein Rückschluss auf die Abdichtwirkung des Bentonits gezogen werden kann. Weiterhin ist der Wassergehalt des Bentonits relevant. Auch der Wassergehalt des Wirtsgesteins ist insbesondere in Ton von Bedeutung, da sich seine Eigenschaften aufgrund von Austrocknung stärker verschlechtern als die des Tonsteins.

Im kristallinen Hartgestein sind insbesondere der Quelldruck der Barrieren, Verschlussbauwerk und Versatz, sowie die Feuchtigkeit des Versatzes relevant. Die genaue Lage der Klüfte in den vorgesehenen Einlagerungsstrecken und ihre Wasserführung sind vor der Einlagerung zu messen und anhand dessen ist zu entscheiden, ob die Strecken für eine Einlagerung in Betracht gezogen werden.

Des Weiteren ist in jedem Wirtsgestein ein Monitoring der mikroseismischen Ereignisse sinnvoll, da es direkt Aufschluss gibt, an welchen Orten im Gebirge Bewegungen stattfinden. Aufgrund der Einflüsse auf die Arbeitssicherheit sind während der Offenhaltungsphase in jedem Fall die aktuellen Wetter zu messen.

Entscheidungskriterien. Die Kriterien für die Entscheidung Rückholung oder Überführung in ein Endlager fußen auf der Funktionalität des Tiefenlagers. Sie umfasst die Gewährleistung der Langzeitsicherheit durch geringe Permeabilität der geologischen und geotechnischen Barriere sowie die Funktionalität der offengehaltenen Infrastrukturräume.

Die Integrität des Wirtsgesteins gilt es während des gesamten Offenhaltungszeitraums zu erhalten. Die durch die Auffahrung geschädigten Bereiche dürfen sich demnach nicht derart vergrößern, dass eine Überführung in ein Endlager zweifelhaft erscheint.

Außerdem ist die Entwicklung der Integrität der geotechnischen Barriere zu beobachten. Dabei ist einerseits zu überprüfen, ob sich die Wirkung des Abdichtungsbauwerks auf die Spannungsverteilung im Tiefenlager wie geplant positiv entwickelt. Andererseits muss beobachtet werden, ob das Widerlager ausreichend dimensioniert ist, um den Quelldruck der auf Bentonit basierenden Verfüllungen in das Gebirge abzutragen.

Im Bereich der Einlagerungsstrecken ist die Integrität des Versatzes und des Gebirges zu überprüfen. Beim Salzgrusversatz beinhaltet das die Kompaktierung des Salzgruses und die Entwicklung der Auflockerungszone im angrenzenden Steinsalz. Bei bentonitbasierten Verfüllungen sind der Quelldruck des Versatzes und der Wassergehalt zu überprüfen.

Zusätzlich zu den genannten Kriterien zur Langzeitsicherheit können im Tiefenlagerprojekt weitere Kriterien zum Offenhaltungsbetrieb sinnvoll sein. So sind in den offengehaltenen Grubenbereichen Messungen, welche über die minimal erforderlichen hinausgehen, möglich und sinnvoll, da an dieser Stelle das Gebirge vollständig zugänglich und durch die Messungen keine weitergehende Schädigung des Gebirges zu erwarten ist.

3.6.6 Technisches Monitoring und Long-term Governance – Erfahrungsbericht Workshop September 2016

Die geplante Rückholbarkeit hoch radioaktiver Abfälle aus einem Tiefenlager stellt Wissenschaft und Gesellschaft vor erhebliche Herausforderungen. Bei Rückholbarkeit ist in jedem Fall davon auszugehen, dass vorausschauende Planungen und Maßnahmen-Entwicklung für ein kontinuierliches technisches Monitoring vorzunehmen sind. Dazu gehören je nach Endlagerkonzept Formen des Monitorings von geologischen und geotechnischen Barrieren und das unmittelbare Monitoring einzelner Behälter. Zusätzlich zu diesem technischen Monitoring, das für Jahrzehnte, möglicherweise aber auch über eine kleine Zahl von Jahrhunderten¹⁰ zuverlässige Messdaten liefern soll, bedarf es gesellschaftlicher Institutionen, die diese Daten zusammen mit Experten interpretieren und Entscheidungen vorbereiten. Diese in gewisser Weise kontinuierliche Dateninterpretation dient dazu, Wissensgrundlagen zu schaffen, damit die Betreiber oder die Aufsicht des Tiefenlagers auf einer geregelten Grundlage Entscheidungen treffen können („Long-term Governance“). Dieses „Entscheidungen-

¹⁰Präzise Angaben, über die auf diese Zeiträume geschlossen werden kann, liegen zur Zeit nicht vor. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Maßnahmen im aktuellen Konzept ausgeschlossen werden, die die Zugänglichkeit und damit die prinzipielle Möglichkeit der Rückholbarkeit nach Ende der Verschlussphase erschweren.

treffen-Können“, meint – zumindest aus Sicht der Technikfolgenabschätzung und Governanceforschung innerhalb von ENTRIA – Verschiedenes: Erstens kann die Entscheidung sein, dass die Monitoring-Daten einen günstigen Verlauf der Einlagerung und der Isolationsleistung signalisieren und dass keine Entscheidungen getroffen werden müssen, die eine Eröffnung einer vertieften Reflexion nötig machen. Stellen sich bei der Datenerhebung allerdings Beobachtungen ein, die auf nicht erwartete Ereignisse hinweisen, gilt es, die Frage nach der Integrität der Barrieren zu beantworten. Bedrohen diese nicht erwarteten Ereignisse die Integrität der Barrieren nicht, ist – so der zweite Fall – keine weitere Entscheidung des Typs „Rückholen-Ja-oder-Nein?“ notwendig. Ergibt die Beobachtung der Daten jedoch, dass die Integrität der Barrieren gefährdet ist, kann drittens die zu fällende Entscheidung sein, dass Abfälle zurückgeholt werden müssen. Ein Teil der Einlagerungsvorgänge oder u. U. auch der gesamte Einlagerungsprozess wird dann angehalten. Weitere Analysen folgen und je nach Analyseergebnis sind Rückholungsvorgänge einzuleiten. Bereits diese drei Möglichkeiten verweisen auf komplexere Entscheidungs- und Beratungsprozesse, die ebenso wie Rückhol-Entscheidungen nach Ende der Betriebsphase (z. B. in einer längeren Beobachtungsphase nach Verschluss der Strecken) sehr voraussetzungsvoll sein werden. Die Fachdiskussion dazu erst steht am Anfang und die verschiedenen möglichen Abläufe waren zum Zeitpunkt des Workshops nur sehr schwach ausgearbeitet.

Auf dem interdisziplinären ENTRIA-Workshop im Oktober 2016 widmeten sich zwanzig Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus technischen und nicht-technischen Fachgebieten dieser Problemstellung. Weitgehende Einigkeit bestand darüber, dass die Ausgestaltung der Long-term Governance in einem „lernenden Prozess“ erfolgen muss, da angesichts zahlreicher Ungewissheiten (wie u. a. die der gesellschaftlich-politischen Entwicklung in den nächsten Jahrhunderten) Vorfestlegungen nur begrenzt möglich sind. Erfahrungen mit der Langzeit-Problematik aus den USA sowie mit Monitoring-Überlegungen anderer europäischer Länder bereicherten die Diskussion. Die Keynotes hielten D. Metlay (Senior Professional Staff of the US Nuclear Waste Technical Review Board) und A. Bergmans (Universität Antwerpen) (siehe dazu die Diskussion ab Seite 359).

Gute interdisziplinäre Forschung benötigt dabei ingenieur- und naturwissenschaftliche Forschung. Entsprechend baute auch der internationale ENTRIA-Workshop „Technical Monitoring and Long-term Governance“ (Karlsruhe, Oktober 2016) auf mehreren sicherheitstechnisch ausge-

richteten Vorträgen zum Thema Monitoring auf¹¹. Jobmann und Liebenstund¹² stellten den internationalen Forschungsstand dar und berücksichtigten in ihren Ausführungen in besonderer Weise die Arbeiten in den EU-Projekten MoDeRn und Modern2020. Anschließend präsentierten mehrere ENTRIA-Mitarbeiter ihre komplementären Arbeiten. Über „Requirements for Monitoring at the Option of Retrievability“ sprach Mintzlaff¹³, während Hassel und Köhler¹⁴ die „Bedeutung der Rückholbarkeit als Option im Zusammenhang mit dem Wunsch und der Notwendigkeit eines Langzeit-Monitorings“ untersuchten.

Mintzlaff stellte auf Basis der durchgeführten Arbeiten die zeitlichen Abschnitte innerhalb des Lebenszyklus eines Tiefenlagers dar, in dem Monitoring nach heutigem Stand der Forschung gut machbar erscheint. Diese Abschnitte erstrecken sich vom Beginn der Errichtungsphase eines Entsorgungsbergwerks über die gesamte Betriebsphase bis in die Nachbetriebsphase hinein. Allerdings seien die Möglichkeiten für die Überwachung sowohl zeitlich wie auch räumlich begrenzt. Die benötigten Messgeber für das in-situ-Monitoring haben nach Stand von Wissenschaft und Technik eine begrenzte Lebensdauer. Ferner sollte die angebrachte Messtechnik die Integrität und die passive Sicherheit der Barrieren nicht beeinträchtigen.

Hassel und Köhler stellten die Bedeutung der Rückholbarkeit und die unterschiedlichen technischen und operativen Folgen dar, die die beabsichtige Durchführung eines problemorientierten Monitorings nach sich zieht. Ausgehend von Monitoringfunktionen in technischen Großanlagen, z. B. einem Staudamm, oder kleineren technischen Produkten, z. B. ein Personenwagen, der mit entwickelten elektronischen Beobachtungssystemen ausgestattet wurde, umreißen sie Notwendigkeiten, die auch bei der Entsorgung von HAW gelten. Einschlägige Herausforderungen wären in einem Tiefenlager mit seinen eingeschränkten räumlichen Möglichkeiten (1) die Umweltbedingungen, (2) die Zugänglichkeit und (3) die Interventionsmöglichkeit. Als Paket wären die Maßnahmen so zu gestalten.

¹¹Siehe dazu das Programm und die Dokumentation der Vorträge unter https://www.itas.kit.edu/veranstaltungen_2016_entria_temo.php. – Die Foliensätze zu den hier aufgeführten Vorträgen sind auf der vorausgehend genannten Website einzusehen.

¹²Jobmann, M., Liebenstund, A.-L. (2016): Modern/Modern2020 – Monitoring im europäischen Kontext. Presentation at the International ENTRIA-Workshop, 18. + 19.10.2016

¹³Mintzlaff, V., Leon Vargas, P., Stahlmann, J. (2016): Monitoring requirements for deep geological repositories with retrievability, Presentation at the International ENTRIA-Workshop, 18. + 19.10.2016

¹⁴Hassel, Th., Köhler, A. (2016): Die Bedeutung der Rückholbarkeit als Option im Zusammenhang mit dem Wunsch und der Notwendigkeit eines Langzeit-Monitorings. Presentation at the International ENTRIA-Workshop, 18. + 19.10.2016

ten, dass die Barrieren nicht gefährdet und möglichst wartungsfreie Sensoren eingesetzt werden können sowie der Datentransfer über nicht zu geringe Entfernungen und die Energieversorgung des Sensors sichergestellt werden kann. Jede dieser letztgenannten Randbedingungen stelle für sich eine Herausforderung dar.

Der Vortrag von Geckeis und Metz¹⁵ thematisierte das Spannungsfeld zwischen „Robustheitserwartungen“ auf der einen Seite und dem Zusammenhang von „Flexibilität“ und Möglichkeiten des Monitorings auf der anderen Seite. Um das zentrale Argument zu erläutern, wieso in wartungsfreie Endlagerkonzepte Vertrauen entwickelt werden könnte, führen sie die Unterscheidungen zwischen „engineered robustness“ and „intrinsic robustness“ ein. Mit Flüeler (2006) stellen sie diese beiden Robustheiten in einem weiteren Zusammenhang. In konzentrischen Kreisen um diese beiden erstgenannten Robustness-Formen zeigen sie, dass eine „performance robustness“ beide Robustheiten umschließt und die wiederum zuerst von einer „Robustheit des technischen Systems“ und diese wiederum von einer „sozialen Robustheit“ eingeschlossen wird, die von robusten Entscheidungslagen abhängt. Die Autoren vertreten zwei beachtenswerte Thesen, wenn sie sagen, dass das Einschreiben von mehr Flexibilität in das Endlager-Konzept, das bei Rückholbarkeit notwendig ist, über lange Zeit nicht per se mehr Sicherheit bedeutet. Unsicherheiten würden – so die zweite These – ansteigen, je länger der Zustand passiver Sicherheit nicht erreicht wird. Durch die Nutzung der Möglichkeit einer Rückholung öffne sich also ein Spannungsfeld zwischen Eingriffs- und Korrekturmöglichkeiten bei der Entsorgung auf der einen Seite und den Zielen von Nachhaltigkeit und Robustheit auf der anderen Seite. Vorausgesetzt wird dabei natürlich, dass die passive Sicherheit nicht nur prognostiziert und wissenschaftlich vorhergesagt wird, sondern tatsächlich auch eintritt.

Soziale Robustheit ist ein Begriff, der von Flüeler in die interdisziplinäre nukleare Entsorgungsforschung eingeführt wurde. Allerdings wurde er noch nicht breit aufgegriffen und spezifiziert. Das soziale Festhalten an einem Gesamtkonzept ist nicht in jedem Fall in Eins zu setzen mit dem tatsächlichen Erreichen eines Sicherheitsniveaus, welches in der Gegenwart und den unmittelbaren folgenden Generationen als ausreichend eingeschätzt wird. In diesem Zusammenhang sind die interdisziplinären Beiträge aus anderen ENTRIA-Teams aufschlussreich, die auf dem Workshop gehalten wurden. Die folgenden Ausführungen unterstreichen den explorativen Charakter, der mehrere interdisziplinäre Kooperationen in

¹⁵Geckeis, H., Metz, V. (2016): Robustness vs. Flexibility and Monitorability in Nuclear Waste Disposal. Presentation at the International ENTRIA-Workshop, 18. + 19.10.2016

ENTRIA auszeichnet. So zeigte Eckhardt¹⁶ in ihrem Vortrag zu Monitoring für ein geologisches Tiefenlager im Schweizer Konzept, wie bei der Standortauswahl in der Schweiz nach dem Scheitern des ersten Anlaufs mit Wellenberg (vgl. Kuppler u. Hocke (2015a)) das Entsorgungskonzept auf konzeptioneller Ebene einen Kompromiss zwischen verschiedenen Kontrahenten im nationalen Entsorgungskonflikt herstellt. Breit angelegte begleitende Forschung sowie die Planung eines strategisch eingesetzten Monitorings schuf dabei die Möglichkeit, auch auf sicherheitstechnischer Seite einen als gangbar eingeschätzten Weg zu ebnen. Vor dem Hintergrund der in nur wenigen Fällen erfolgreich umgesetzten Realisierungen von Tiefenlagerprojekten mit hoch radioaktiven Abfällen stellt sich die Frage, ob die angestrebte Annäherung an das Erreichen passiver Sicherheit sozial nicht genau den Ansatzpunkt für das Fortschreiben alter Konflikte zwischen Nuklearkritikern und Unterstützern einer Entsorgungslösung im tiefen Untergrund liefert.

Die Unsicherheiten und die verschiedenen Formen des Nicht-Wissens unterstreicht Böschen¹⁷ in seinem Vortrag, in dem Nicht-Wissen und Unsicherheit in anspruchsvollen soziotechnischen Prozessen der Technikgestaltung betrachtet werden. Böschen geht von „Wissensregimen“ aus, die in modernen Gesellschaften Wissen jeweils nur temporär stabilisieren können. Politische Festsetzungen und Regulierungen würden ebenso eingreifen wie diskursiv konstruierte und institutionell stabile Räume, die Problemlösungen als wissenschaftsbasiert absichern: Durch das Durchsetzen von Problemdeutungen wird Wissen temporär stabilisiert und Nichtwissen i. d. R. als Noch-Nicht-Wissen verstanden. Dem stehen aber Prozesse ziviler Epistemologien¹⁸ gegenüber, die aktuelle Wissensbestände überprüfen; dies geschieht mit wissenschaftlichen Argumenten ebenso wie mit außerwissenschaftlichen, die von jeweils spezifischen Wissensstrukturen und Relevanzsystemen unterstützt werden¹⁹. Folgt man dieser Auslegungsrichtung der Problemlage bei der nuklearen Entsorgung, so zeigt sich, dass sich spätmoderne Gesellschaften, die immer auch Wissensgesellschaften sind (siehe Kap. 5.2), auf selbstlernende und reflexive Prozesse der Verfahrensgestaltung einstellen müssen. Für

¹⁶Eckhardt, A. (2016): Monitoring in the Swiss Concept of Deep Geological Repositories. Presentation at the International ENTRIA-Workshop, 18. + 19.10.2016

¹⁷Bösch, S. (2016): Uncertainty and Non-Knowledge in the Context of Ambitious Sociotechnological Solutions. Presentation at the International ENTRIA-Workshop, 18. + 19.10.2016

¹⁸Epistemologien sind die jeweiligen fachspezifischen wissenschaftstheoretischen Konzepte, die in jeder Disziplin bei fachlichen Erörterungen als Prämissen mit eingehen.

¹⁹Bösch folgt damit Jasanoff, die unter „civic epistemology“ institutionalisierte Praxisformen versteht, bei denen „members of a given society test and deploy knowledge claims used as a basis for making collective choices“ (Jasanoff, 2007, S. 255).

diese bedarf es robuster Institutionen, die jenseits unmittelbarer operativer Verantwortung bei der nuklearen Entsorgung längere Zeiträume und Verschiebungen in den Wissensordnungen im Blick haben müssen. Da ihr Bezugspunkt dabei immer soziotechnische Prozesse sind, also Prozesse, bei denen technisch-wissenschaftliche und soziale Gestaltung ineinandergreifen, sind diese Verschiebungen sowohl von der technischen wie auch von der sozialen Seite her zu erwarten.

Bei Zeiträumen von mehreren bis zu mehr als einem Dutzend Jahrzehnten, die planerisch zu berücksichtigen sind, müssen nach Hocke u. Kuppler²⁰ (2016) spezielle Institutionen mit Zielsetzungen der Long-term Governance wie auch spezieller Formen des amerikanischen Stewardship-Modells berücksichtigt werden (siehe dazu auch Kap. 5.2.3).

Im Ergebnis²¹ zeigte der Workshop, dass für das Monitoring im Rahmen der Entsorgung von hoch radioaktiven Abfällen die soziotechnische Herausforderung erheblich ist. Dafür sind folgende fünf Aspekte anzuführen:

1. Wann der ausreichende Status eines Endlagersystems zum Übergang in die Phase passiver Sicherheit erreicht ist, kann heute noch nicht eindeutig festgelegt werden. Die beteiligten Generationen werden sich u. U. an heutigen Entscheidungen orientieren.
2. Allerdings ist mindestens ungewiss, ob sie die gleichen oder andere Sicherheitserwartungen besitzen werden wie unsere gegenwärtige Generation, die einen gangbaren Auswahlprozess kriteriengestützt festlegen und dabei auch ein plausibles Konzept für die nächsten drei oder vier Jahrzehnte bei hoch radioaktiven Abfällen vorlegen will. Die Kritik an den Pfadabhängigkeiten früherer Entsorgungskonzepte wird durch die proklamierte Notwendigkeit eines robusten und zielorientierten Vorgehens nicht ausgehebelt. Vielmehr kann die Notwendigkeit der periodischen Alternativenprüfung in einem stufenweisen Auswahlverfahren aufrechterhalten werden. Allerdings stellt diese periodische Alternativenprüfung nur eine Maxime dar, die nicht garantiert werden kann.
3. Ihre Robustheit kann dieses Vorgehen also nicht heute, sondern nur in der jeweiligen Phase gegenüber der jeweiligen Fachöffentlichkeit und der interessierten Öffentlichkeit darlegen. Inwiefern das jeweilige Wissensregime der Entsorgungsexperten dann überzeugt, wird

²⁰Kuppler, S., Hocke, P. (2016): Governance als Analysekonzept für die aktuelle Endlagerpolitik? Ein Problemaufriss. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“. Institut für Radioökologie und Strahlenschutz. Hannover, 02.02.2016.

²¹Zu den Herausforderungen siehe auch Kuppler u. Hocke (2018).

nicht heute vorentschieden. Wahrscheinlich wird sie nur durch eine Reihe soziotechnisch erweiterter Fachdiskussionen zu erhellen sein, die ins nächste Jahrhundert hineinreichen wird.

4. Flexibilität im Tiefenlagerprojekt ist ebenso notwendig. Bereits zum Zeitpunkt des Workshops, aber erst recht zurzeit (Anfang 2018) war und ist absehbar, dass der Öffentlichkeitsbeteiligung wesentlich mehr Raum eingeräumt wird, als dies bisher bei der Entsorgungspolitik in Deutschland die Praxis war. Die Community der Endlagerspezialisten wird also nicht nur fachlich überzeugende Antworten liefern müssen, wie auf natürliche Prozesse im tiefen Untergrund zu reagieren ist. Vielmehr gehört auch dazu, Flexibilität im sozialen Raum zu beweisen, der den Standortauswahlprozess mit allen späteren Phasen umschließen wird.
5. Hohe Prozessqualität wird für beide Aspekte, also den technischen und den sozialen in der Forschung und Entwicklung, aber auch in Reaktion auf gesellschaftliche Erwartungen Sachzwänge erzeugen. Welche Sachzwänge dann die Tiefe der Monitoring-Eingriffe in das Endlagersystem bestimmen werden, kann heute nur vermutet werden. Sie gehören aber in den Bereich des sozialen Nicht-Wissens. Long-term Governance bietet konzeptionell Gelegenheit, den Begriff des robusten Wissens periodisch zu überprüfen und zu ergänzen. Dafür wird es Institutionen brauchen, die wie ein Steward im erweiterten DOE-Modell²² sowohl das konkrete Anlagenmanagement im Blick haben als auch die Handlungsfähigkeit der zuständigen Institutionen. Diese Institutionen haben auch bei unerwarteten geologischen und technischen Entwicklungen handlungsfähig zu bleiben. Aufmerksamkeitsverluste durch Politik, Zivilgesellschaft und Wirtschaft, aber auch durch Regierungsinstitutionen sind bis zu einem gewissen Grad zu erwarten. Dies hat seinen Grund in den Grundstrukturen von Abfallpolitik, in denen Abfälle als nutzlos abgewertet werden. Long-term Governance ist also mehr als formell korrekte Genehmigungsverfahren und administrativ zielführendes Handeln. Es bedarf angesichts des Isolationszeitraums so eines zielorientierten Anlagenmanagements, technischer Kontrolle und problemorientierten (und immer wieder fortzuschreibenden) Monitorings sowie einer speziellen Urteilkraft für gesellschaftliche Entwicklungen und Erwartungen.

²²Zum DOE-Modell und seiner Erweiterung siehe (Kuppler u. Hocke, 2015b, S. 6–10).

3.6.7 Ausblick und offene Fragen

Im Zuge der Arbeiten zum geotechnischen Monitoring wurden in diesem Vorhaben deterministische Parameter zur Beschreibung des Gebirgsverhaltens verwendet, die dann mit deterministisch basierten Kriterien, d. h. konkreten Werten verglichen wurde. Das natürliche Verhalten von Gebirge ist jedoch stochastisch. Die beschreibenden Parameter weisen eine natürliche Bandbreite auf. Zukünftig ist daher zu untersuchen, in welcher Bandbreite sich die Messwerte bewegen dürfen, ohne dass unplanmäßige Entwicklungen in Betracht gezogen werden müssen. Weiterhin endet das entwickelte Monitoringkonzept mit dem Zeitpunkt der Entscheidung Rückholung / Endlagerung. Die Gewährleistung der Standsicherheit der aufzuwältigen Hohlräume während des Rückholungsprozesses sowie die Spannungsumlagerungen infolge auch neu aufzufahrender Hohlräume ist allerdings von besonderer Bedeutung, da im Fall eines Verbruchs der Grube von einer unkontrollierbaren Radionuklidausbreitung ausgegangen werden muss. Der Rückholungsprozess wäre hierdurch stark gefährdet. Um die Entwicklung der Zustandsänderungen zu beobachten und ggf. rechtzeitige Sicherungsmaßnahmen einleiten zu können, ist ein entsprechendes weiterführendes Monitoringkonzept zu entwickeln.

- Welche Konsequenzen ergeben sich für die Gesellschaft aus der Notwendigkeit eines langfristigen Monitorings und der permanenten Entscheidungserfordernis?
- Wer betreibt das Monitoring, wertet die Messwerte aus und interpretiert die Ergebnisse?
- Wie geht man mit den Systemungewissheiten im geologischen Modell, im Monitoringprozess, in den numerischen Untersuchungen sowie den Ungewissheiten in der gesellschaftlichen Entwicklung um?
- Wer entscheidet über die Rückholung und wichtet deren Auswirkungen im Vergleich zu einem Verbleib der Reststoffe im Tiefenlager?
- Die soziotechnischen Herausforderungen werden erheblich sein. Prinzipiell betreffen sie die zugesicherte Flexibilität in einem stufenweisen Verfahren ebenso wie die notwendige Folgenreflexion angesichts plausibler Erwartungen an die technische Robustheit.
- Wie kann der Akzeptanzgewinn in der Gesellschaft durch Monitoring gegen potentiell hierdurch induzierte zusätzliche Risiken gewichtet werden? (Besonders relevant für die technische Barriere, da

hier oft eine direkte Wechselwirkung des Monitoringsystems mit den Barrieren erfolgen kann)

- Wer entscheidet, in wie weit Aspekte des Monitorings im Kriterienkatalog zur Standortauswahl berücksichtigt werden (müssen)?

Beispiel A: Platzbedarf der Monitoringsohle (Ausschluss für flach gelagertes Salz?)

Beispiel B: Beim Monitoring der technischen Barriere zur Unterstützung einer Rückholentscheidung können einige wichtige Parameter nicht ohne eine Schädigung des Barrierensystems an den beladenen Behältern ermittelt werden, sodass diese Messungen nur an Dummy Behältern durchgeführt werden können. Eine Übertragbarkeit der so ermittelten Daten ist allerdings nur in einem weitestgehend homogenen Tiefenlager gegeben. Stehen keine „Vergleichsbereiche“ außerhalb der Einlagerungsstrecken zur Verfügung, so könnte dies ein Ausschlusskriterium darstellen.

Literatur

[BMU 2010] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 2010 – Forschungsbericht

[StandAG 2017] Deutscher Bundestag: *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG)*. Juli 2017 – Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.

[Endlagerkommission 2016] Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Hrsg.). Deutscher Bundestag: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Verantwortung für die Zukunft: Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes / Deutscher Bundestag. Berlin, 2016 (18/9100) – Bundestagsdrucksache – 684 S.

[Flüeler 2006] Flüeler, Thomas: *Decision making for complex socio-technical systems: robustness from lessons learned in long-term radioactive waste governance*. Dordrecht: Springer, 2006 (Environment & policy v. 42)

[Jasanoff 2007] Jasanoff, Sheila: *Designs on Nature: Science and Democracy in Europe and the United States*. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 2007

- [Kuppler u. Hocke 2015a] Kuppler, Sophie; Hocke, Peter: “Enabling” Public Participation in a Social Conflict. The Role of Long-Term Planning in Nuclear Waste Governance. In: *The Next Horizon of Technology Assessment - Proceedings from the PACITA 2015 Conference in Berlin*. Prag, 2015, 121–125
- [Kuppler u. Hocke 2015b] Kuppler, Sophie; Hocke, Peter: “Enabling” public participation in a social conflict. The role of long-term planning in nuclear waste governance. <http://www.academia.edu/14483549/>. Karlsruhe, 2015 – Interner Bericht
- [Kuppler u. Hocke 2018] Kuppler, Sophie; Hocke, Peter: The role of long-term planning in nuclear waste governance. In: *Journal of Risk Research* (2018) – Im Erscheinen
- [Stahlmann u. a. 2018] Stahlmann, Joachim; Léon Vargas, Rocio P.; Mintzlaff, Volker; Epkenhans, Ida: Normalszenarien und Monitoringkonzepte für Tiefenlager mit der Option Rückholung. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2018 – ENTRIA Arbeitsbericht – In Vorbereitung.

3.7 Governance als Modus politischer Steuerung und Möglichkeit der Konfliktregulierung

Governance, als disziplin-übergreifendes Konzept, ermöglichte eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Sozial- und Politik- sowie Rechtswissenschaften. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der interdisziplinären Governance-Forschung in ENTRIA – des ITAS des KIT, des FFU der FU Berlin und des IRW der TU Braunschweig – zusammenfassend dargestellt. Teilweise werden die nachfolgenden Ausführungen in den jeweiligen disziplinären Kapiteln vertieft. Zum Gang der Darstellung:

- Kapitel 3.7.1 erläutert den Grundgedanken des Theorems „Governance“ in der einschlägigen Forschung und arbeitet die Elemente heraus, die die Analyse der Endlagerpolitik und die Suche nach einem Standort für die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle in den Kontext modernen Regierens mit speziellen Formen der Steuerung und Öffentlichkeitsbeteiligung stellt. Da plurale Erklärungsansätze das Forschungsfeld zu Governance, das als Gegenkonzept zu Government verstanden wird, prägen, ist eine interdisziplinäre Betrachtung sinnvoll und notwendig.
- Kapitel 3.7.2 stellt die Grundzüge eines Mehrebenen-Systems dar, in das auch die nukleare Entsorgungspolitik in Deutschland einzuordnen ist. Hierbei werden die aktuellen Entwicklungen in der deutschen Entsorgungspolitik fallbezogen aufgezeigt, die insbesondere durch das Standortauswahlgesetz (StandAG, 2013) und seine Fortschreibungen (2017) sowie die Endlagerkommission mit ihrer dialogisch ausgerichteten Kommissionsarbeit in einen breiteren Kontext eingeordnet werden können.
- Kapitel 3.7.3 greift auf empirische Erhebungen zurück und thematisiert Erwartungen, die aus der Kommunalpolitik und den Bürgerinitiativen an die Entsorgungspolitik gestellt werden. Sie stellen eine Referenzgröße her, da beide Akteursgruppen in der alten Entsorgungspolitik vor 2011 nicht angemessen berücksichtigt wurden. Dieses Nicht-Anerkennen führte u. a. zu den erfolgreichen Protestmobilisierungen der Anti-Atomkraft-Bewegung und unterschiedlichen Arten von Unzufriedenheit in Standortkommunen, in denen sich Nuklearanlagen befanden oder angedacht waren (vgl. Brunnengräber u. Hocke (2014); Rucht (2008); Roose (2010); Radkau u. Hahn (2013)).

- Kapitel 3.7.4 führt die Gesetzgebung im engen Sinn und weitere Formen staatlicher Regulierungen aus,
- bevor in Kapitel 3.7.5 ein Blick auf zukünftige Herausforderungen einer transparenten und wissenschaftsbasierten Governance geworfen wird, die insbesondere bei einem Tiefenlager mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit, aber auch bei einem wartungsfreien Tiefenlager mit einer über einige Jahre andauernde Betriebsphase zu erwarten sind.

In die Arbeiten in Kapitel 3.7 gehen Forschungen aus der Politischen Soziologie, der Umweltpolitikologie, der sozialwissenschaftlichen Endlagerforschung, der Technikfolgenabschätzung und der Rechtswissenschaften ein. Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, wird nur an den Stellen auf Differenzen innerhalb der Fachdisziplinen sowie den jeweiligen Forschungsstand eingegangen, an denen so das Verständnis der nuklearen Entsorgungspolitik und das Verständnis der zu Grunde liegenden soziotechnischen Prozesse erhöht wird. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass vor dem Start von ENTRIA die sozialwissenschaftlich ausgerichtete Endlagerforschung so gut wie nicht existierte (zum Forschungsstand und den wichtigen Ausnahmen siehe Hocke (2015b)). Dieses Defizit hat sich durch die zahlreichen Veröffentlichungen aus ENTRIA und aus den parallel zu den Arbeiten der Endlagerkommission stattfindenden Debatten etwas verringert.

3.7.1 Governance als modernes Regieren

Regieren hat sich verändert. Es bewegt sich weg vom klassischen, formalen Regierungshandeln (genannt „Government“), bei dem Partizipation überwiegend nur in Form von Wahlen oder als Öffentlichkeitsbeteiligung je nach Genehmigungsverfahren punktuell stattfindet, hin zu „Governance“. Governance wird in besonderer Weise dadurch bestimmt, dass nicht-staatliche Akteure frühzeitig in die Entscheidungsfindung eingebunden werden. Hintergrund dieses Politikstilwechsels ist, dass eine plurale, in sich fragmentierte Gesellschaft große Herausforderungen an die „Interessenaggregation“ stellt, und nicht mehr nur auf relativ stabile, vordefinierte und meist im parteipolitischen Spektrum repräsentierte Interessengruppen zurückgegriffen werden kann.

Parteienkritik, Soziale Bewegungen und die Rede von „Staatsversagen“²³ greifen als politische Diskurse diese Verwerfungen auf. Diese

²³Zu Sozialen Bewegungen Roth u. Rucht (2008) und Della Porta (2014), zum Konzept des Staatsversagens Jänicke (1987) und Seite 185ff

Diskurse führen dazu, dass Vorstellungen einer Demokratie, die sich bei der Interessenaggregation durch parlamentarisches Handeln und dahinter liegende Parlamentswahlen abstützt, insbesondere bei technischen Großprojekten mit gesellschaftlichen Widersprüchen, Protesten und Erwartungen der Zivilgesellschaft konfrontiert werden. Diese Widersprüche Proteste und Erwartungen verdichten sich immer wieder in dem Wunsch, technische Großprojekte mitgestalten zu können, indem wichtige Entscheidungen kooperativ vorbereitet und abgestimmt mit der Zivilgesellschaft getroffen werden. Dies gilt nicht nur für die Entsorgung radioaktiver Abfälle, sondern auch bei anderen gesellschaftlichen Aufgaben (wie der Reform des Sozialsystems oder beim Umbau des Energiesystems). Da bislang kein einheitliches Verständnis und daher auch keine allgemeingültige Definition vorliegen, bedarf die Verwendung des Begriffs Governance in der Entsorgungsforschung einer gegenstandsbezogenen Präzisierung. Der Begriff lässt sich etwa durch die Addition spezifischer Attribute akzentuieren. In den folgenden Kapiteln werden daher unterschiedliche Formen von Governance aufgegriffen und diskutiert, wie z. B. der Ansatz der „Good Governance“ (Seite 172f), der „New Governance“²⁴, der „Global Governance“, „Local Governance“ oder der „Multilevel Governance“ (Benz (2010) und siehe Kapitel 3.7.2 folgende)²⁵. Für verschiedene Fachpolitiken (wie der Verkehrspolitik oder der nuklearen Entsorgung) entstehen dadurch spezifische vielfältige Akteurskonstellationen und institutionelle Architekturen, welche zu treffende Entscheidungen vorbereiten und die getroffenen Entscheidungen umsetzen. Die gesellschaftliche Entscheidungsfindung findet gleichfalls auf vielen verschiedenen Ebenen statt und kann je nach Situation für verschiedene Akteure unterschiedlich offen oder geschlossen sein. Nicht alle kollektiven Akteure (wie etablierte Industrieverbände, zivilgesellschaftliche Assoziationen wie Bürgerinitiativen oder Landkreise) erhalten z. B. in der Bundespolitik Zugang und Stimme bei der Entscheidungsfindung, finden aber möglicherweise auf anderer Ebene im Mehrebenen-System Gehör (siehe auch Kapitel 3.7.2). Diese Vielfalt kann in ihrer Widersprüchlichkeit und scheinbaren Unvereinbarkeit teilweise den Eindruck erwecken, einen Zustand der „Unregierbarkeit“ hervorzurufen. Vor diesem Hintergrund haben die formal verantwortlichen Schlüsselakteure inzwischen gesehen, dass klassische Top-Down-Steuerungsansätze bei vielen Themenlagen nicht zielführend sind. Entsprechend wird je nach Thema und

²⁴Hocke, P. (2013), a. a. O.

²⁵Ansätze wie „Global Governance“, „Local Governance“ oder „Multilevel Governance“ (Benz, 2010) fokussieren bspw. auf unterschiedliche territoriale Kontexte bzw. Organisationsebenen kollektiver Regelungen (Walk, 2008, S. 34).

Konfliktstruktur darüber nachgedacht, ob Entscheidungsvorbereitungen und Entscheidungsfindung, also Interessenaggregation und die Entscheidung zwischen den sich abzeichnenden Handlungsalternativen in einem offenen oder einem geschlossenen Entscheidungssystem stattfinden soll (Hocke, 2015a, S. 188f). In solchen Themenfeldern entstehen oft schon während erster Phasen der Entscheidungsvorbereitung auf der Ebene der Interessenartikulation heftige Interaktionen und Interessenkonflikte, die z. T. über die Massenmedien, fallweise aber auch über Proteste und deren öffentliche Wirkungen ausgetragen werden (Neidhardt, 1994). In anderen Anlagenkonflikten treten sie erst später im Verfahren auf, Stuttgart 21 ist dafür ein prominentes Beispiel (Spieker u. Bachl, 2013).

Allgemein lässt sich jedoch auf Basis der vorliegenden Studien sagen: Diese Konflikte treten immer wieder auf, wenn Schlüsselentscheidungen (wie Gesetzesvorhaben oder Wechsel der Zuständigkeiten) zu fällen sind. Es bestehen also häufig komplexe Interaktionen zwischen den Akteuren und den teilweise sehr unterschiedlichen Erwartungshaltungen (Kuppler, 2016). Eine frühzeitige Einbindung von einer Vielzahl an Akteuren, meist über informelle Foren, soll diese Defizite des klassischen Governments auflösen und Mitsprache bei Fragen der Gestaltung von Partizipation u. a. durch Dialog ermöglichen und so zu dialogisch-orientiertem Regierungshandeln führen²⁶ (Mbah, 2017). Folglich handelt es sich bei Governance um ein Konzept, das eine Verlagerung des Regierens durch Regierungsorganisationen hin zu einem Regieren in Netzwerken untersucht. Es wird also nach Formen der Koordination, Kooperation und der Qualität von Dialogen und Beratungen zwischen kollektiven Akteuren gefragt, die für bestimmte Themen verantwortlich oder an der Entscheidungsvorbereitung interessiert sind. Entsprechend wird das Ob und Wie betrachtet, bei dem nicht-staatliche kollektive Akteure in die politische Entscheidungsfindung einbezogen werden (Kuppler, 2017, S. 64). Es wird untersucht, ob sich fachliche Entscheidungssysteme gegenüber der interessierten Öffentlichkeit, Stakeholdergruppen und der Zivilgesellschaft²⁷ öffnen.

²⁶Hocke, P. (2017): Governance, Staatlichkeit und Gegenwartsanalyse angesichts der aktuellen Endlagerproblematik: ein Problemaufriss. Unter Mitarbeit von S. Kuppler. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“. Institut für Radioökologie und Strahlenschutz. Hannover, 17.01.2017.

²⁷Unter „Zivilgesellschaft“ wird hier ein gesellschaftlicher Sektor verstanden, der sich klar von (etablierter) Politik, Wirtschaft und Wissenschaft unterscheidet und durch ein gewisses Maß an loser Netzworkebildung auszeichnet, die neben der allgemeinen und der interessierten Öffentlichkeit steht. D. h. es kann im soziologischen Sinn nicht von einer gewissen Intensität verbindlicher Organisiertheit ausgegangen werden, sondern es geht primär um lose Netzwerke bürgerschaftlichen Engagements. Politik, Verbände (wie z. B. der ADAC) und advokatorische Interessengruppen (wie der Bund für Umwelt- und Na-

Der Wandel der Entsorgungspolitik hat seinen Hintergrund unter anderem in der veränderten Rolle der Kernenergie. Dieser Wandel ist Teil einer gesellschaftlichen Reaktion auf Risiken der klassischen Moderne, ein Prozess der reflexiven Modernisierung (Beck u. a., 1996). Die Nebenfolgen des Einsatzes der Kernenergie werden zum Hauptgegenstand des gesellschaftlichen Konflikts²⁸, der von der Zivilgesellschaft und selbstbewussten Regionen auf zwei Ebenen befeuert wird: erstens der Konflikt um die Regulierung der nuklearen Entsorgung und zweitens der Konflikt um die bestehenden institutionellen Arrangements. In modernen, offenen Gesellschaften sind Diskurse und Auseinandersetzungen dieser Art nicht kontrollierbar²⁹. Normativität und Pluralität der Positionen sind in moderne offene Gesellschaften eingeschrieben. Häufig finden „Perspektivwechsel“ statt, seltener, aber immer wieder auch „Paradigmenwechsel“.

Hartmut Rosa steht für einen sozialwissenschaftlichen Perspektivwechsel, und zwar in Abkehr von systemtheoretischen Ansätzen hin zu einem akteurstheoretischen Zugang, indem er vom Individuum her denkt und eine differenzierte Analyse der aktuellen Moderne vorlegt. Es gehört zum Grundversprechen der Moderne, dass Individuen handlungsmächtige (politische) Subjekte sind, d. h. sie können sich selbstständig in gesellschaftliche Prozesse einbringen und dort mit guten Argumenten und angemessenen Handlungen wirksam werden (Rosa, 2016, S. 378). Zunehmend stellt sich jedoch ein Zustand der Ohnmacht ein, nicht nur in den ökonomischen, sondern auch in den politischen Verhältnissen. Individuen sind immer häufiger der Ansicht, dass ihre Handlungsmacht eingeschränkt wird und ihre Anliegen und Sorgen im politischen Prozess nicht vertreten sind. Es fehlen Räume, so Rosa, in denen „Resonanz“ für interessierte Öffentlichkeiten hergestellt werden. Resonanz bedeutet Zuwendung gegenüber schwach etablierten Interessen und Erweiterung von Entscheidungs- und Routinen – Entscheidungs- und Routinen, die meist mit terminlichen Sachzwängen und beschleunigten Abstimmungsprozessen begründet werden. Vor diesem Hintergrund werden demokratische Innovationen für die Entsorgungspolitik benötigt³⁰.

tenschutz Deutschland) zeichnen sich dagegen durch feste Mitgliedschaften und damit durch Organisiertheit aus, die in der Zivilgesellschaft so nicht anzutreffen sind.

²⁸Der Begriff „Konflikt“ ist hier innenpolitisch ausgerichtet und lehnt sich an die Strömungen der Konfliktforschung an, die Dissens und Auseinandersetzungen ebenso wie manifeste Konflikte als festen Bestandteil von Gesellschaft ansehen. Die innenpolitische Ausrichtung hat ihren Grund in der weitgehend national ausgerichteten Fachpolitik zur Entsorgung zivil erzeugter nuklearer Abfälle und Reststoffe.

²⁹Hocke, P. (2017), a. a. O.

³⁰Hocke, P. (2017): a. a. O.

Durch die Untersuchung von Prozessen der Kooperation und Koordination mithilfe von Gegenwartsdiagnosen entsteht Orientierungswissen für die Gestaltung politischer Entscheidungsprozesse (Grunwald, 2016). Die Entscheidungslinien der nuklearen Entsorgung sind als Ganzes ein empirischer Fall, für den eine anspruchsvolle Analyse von Governance-Prozessen sinnvoll ist, da in verschiedenen Ländern Erfahrungen mit Versuchen von sozialen Innovationen gemacht, diese aber bisher nur in Grenzen wissenschaftlich reflektiert wurden. Insgesamt lässt sich festhalten, dass gehaltvolle Partizipation bisher die Ausnahme ist. Ein Trend zu Governance und modernem Regieren ist weder einheitlich noch eindeutig festzustellen (Grande, 2012, S. 575 u. 585). Dies gilt auch für die fortschrittlichen Länder mit partizipativ ausgerichteter Entsorgungspolitik und Projektfortschritten in der nuklearen Entsorgung (Schweden, Schweiz, Finnland) (z. B. zu Schweiz Hocke u. Kuppler (2015), zu Schweden Elam u. Sundqvist (2011)). Gleichwohl lassen sich aus den Erfahrungen der einzelnen Länder Schlüsse ziehen über Mindestbedingungen, die kooperative Entscheidungsfindung in der nuklearen Entsorgungsfindung erfüllen müsste, wenn diese ernsthaft umgesetzt werden sollte (siehe hierzu Seite 337ff).

Governance als Good Governance

Bei Berücksichtigung der frühen Governance-Literatur fällt auf, dass die europäische Diskussion um „Good Governance“ wichtige Impulse lieferte, um eine neue Debatte um politische Steuerung und Koordination zu führen (Benz (2004); EC (2001); Smith (2009), kritisch Offe (2008)). Implizit wird dabei eine starke Kopplung von Regierungshandeln (modifiziertes Government), Anlässen für Öffentlichkeitsbeteiligung und verstärkt auftretenden Forderungen aus der Zivilgesellschaft nach gehaltvoller politischer Partizipation jenseits etablierter Formen von Interessenvertretung gefordert (Roth, 2011, insb. S. 83ff u. S. 141). Die Einbindung der Bevölkerung durch partizipative Ansätze wurde auch in den Politik- und Sozialwissenschaften zum Gegenstand einer der vitalsten Debatten der letzten beiden Jahrzehnte (Grande, 2012). Dies spiegelt sich gleichfalls in der europäischen Forschung und Fachpolitik wider. Es liegen jedoch sehr unterschiedliche Verständnisse von Governance vor. Im abschließenden Bericht des „European Community Waste Management Project“ wird Governance beispielsweise neben Menschenrechten, Inklusion und Gerechtigkeit gestellt und damit als eine europaweit gültige Zielgröße dargestellt (COWAM, 2007). So wird Governance zu einem normativen Konzept umgedeutet und dabei auf internationale Akteure verwiesen, die wie

die Weltbank ebenfalls mit dieser modifizierten Steuerungsidee operieren (Kuppler, 2017; Czada, 2010).

Nicht berücksichtigt wird dabei, dass konstruktiv-kritische Governance-Konzepte in Ansätzen, wie dem von der Weltbank verfolgten, bei ihrer Operationalisierung häufig auf Indikatoren reduziert werden, anhand derer die Performanz von Staaten gemessen wird. Darin spiegelt sich ein unterkomplexes Verständnis von Regieren, indem es auf ein reines „Abhaken“ der einzelnen Kriterien reduziert wird (Czada, 2010). Positiv gewendet fokussiert dieses Verständnis von Governance auf „Formen des Verhandelns & Argumentierens zwischen Staat und steuerungsrelevanten Akteuren“ (Haus, 2010, S. 162f). Sie kann als „kooperativ ergebnisorientierte“ Perspektive bezeichnet werden (ebd.) und befasst sich mit funktionalen Änderungen in der Zusammenarbeit von kollektiven und Einzel-Akteuren. Dazu gehören sowohl formelle Komponenten staatlichen Handelns, die durch Gesetze und Richtlinien bestimmt sind, sowie informelle Komponenten, wie Beratungsgremien, erweiterte Formen der Beteiligung der interessierten Öffentlichkeit also auch transparente Beratungs- und Aushandlungsprozesse mit Stakeholdern³¹.

Es wird erwartet, dass durch die Einbindung der Öffentlichkeit die Robustheit und damit über die Zeit auch die Effizienz der Entscheidungsprozesse gesteigert wird (vgl. Lange u. Schimank (2004)).

Governance und nukleare Entsorgung

Governance von hoch radioaktivem Abfall befasst sich mit komplexen gesellschaftlichen Interaktions- und Integrationsprozessen, während sich Management von hoch radioaktivem Abfall ausschließlich mit den technischen Aspekten des Problems auseinandersetzt (Kuppler, 2017). Regierungen verschiedener Länder versuchten, Entsorgungskonflikte durch die Organisation dialogischer Ereignisse im Rahmen der Entscheidungsfindung zu verhindern oder aufzulösen, scheiterten aber in vielen Fällen. Als ein Lösungsansatz, der dabei seit Ende der 1990er Jahre verfolgt wurde, ist hier „Governance“ zu erkennen, der mit Elementen von „Partizipation“ und „Deliberation“ verknüpft wurde³². Governance von hoch radio-

³¹Regierungshandeln in demokratischen Gesellschaften war schon immer durch den Einfluss von Lobbygruppen wie Industrieverbänden, Gewerkschaften und anderen Gremien bestimmt. Advokatorische Interessengruppen, die nicht unmittelbar die Interessen ihrer Mitglieder vertreten, sondern als Sprecher für ressourcenschwache Akteure und oft auch öffentliche Güter (wie z. B. Gesundheit, Umwelt) eintreten, waren dagegen trotz nachweisbarer Betroffenheit nicht in Prozesse des parlamentarisch-politischen Komplexes eingebunden (Habermas, 1992).

³²Z. B. OECD/NEA „Forum on Stakeholder Confidence“ und auch das EU-Projekt COWAM.

aktivem Abfall hat technische und soziale Aspekte und ist daher „doubly-complex“ (Dryzek, 1996). Da Entsorgungs-Governance generell und in gewissen Grenzen auch der Gegenstand der jeweiligen Abfallart immer wieder Neubewertungsprozessen unterzogen wird, ist er gleichzeitig als „wicked problem“ einzustufen (Rittel u. Webber (1973); Brunnengraber u. a. (2012); siehe für eine genaue Definition Kapitel 3.7.2). Verschiedene Sichtweisen des Problems und Forderungen in Bezug auf Beteiligung stehen Eigenlogiken und Pfadabhängigkeiten von politischen Entscheidern gegenüber, die nur geringe Handlungsspielräume sehen. Diese Verwickeltheit des Entsorgungsproblems beruht auf technisch-naturwissenschaftlichen und sozialen Ungewissheiten, Unsicherheiten und Komplexitäten.

Auf technischer Ebene liegen die Ungewissheiten beim technischen Artefakt Bergwerk. In der Entwicklung der technischen Installation von Bergwerken bestehen Ungewissheiten bezüglich der Isolationswirkung der geologischen Barriere, die bei der Einlagerung nuklearer Abfälle besonders hervorgehoben wird. Zudem bestehen Ungewissheiten in Bezug auf die Entwicklung des geologischen Systems bei einer längerfristigen Offenhaltung des Bergwerks, wie es für die Einlagerung nuklearer Abfälle erforderlich ist. Diese Offenhaltung führt zu einer Schädigung des geologischen Systems, deren Wirkungen und sicherheitstechnisch nachteilige Folgen nur mittels technischer Maßnahmen ausgeglichen werden können. Eine Prognose der Entwicklung des geologischen Systems über lange Zeiträume hinweg kann nur auf Basis von Modellen und Experimenten postuliert werden (Mbah, 2016). Diese Ungewissheiten und Unsicherheiten bezüglich des Zusammenspiels geologischer, geotechnischer und technischer Barrieren, die einerseits durch weitergehende Forschung reduziert werden sollen und andererseits nicht aufzulösen sein werden bzw. neue hinzukommen können, verweisen somit auf verschiedene Formen des Nicht-Wissens (siehe Wulf (2015))³³.

Auf sozialer Ebene liegen die Unsicherheiten einerseits bei der Schwierigkeit der plausiblen Darstellung der Übertragbarkeit von „Laborversuchen“³⁴ auf die „reale“ Welt. Andererseits gibt es eine grundsätzliche Ungewissheit wissenschaftlichen Wissens für extrem lange Zeiträume und eine nicht abschließend geklärte Rolle wissenschaftlicher Expertise in der Entscheidungsfindung. Die Komplexität des Problems erfordert soziale Effekte der gewählten Behandlungsmethode zu untersuchen sowie die „Auswahl“ der Art des Regierens zu überprüfen. Unsicherheiten und Nicht-Wissen, die als Kontingenzen zu betrachten sind, können Hand-

³³Siehe auch Kapitel 5.2.

³⁴Die Hervorhebung der Laborversuche ist dem Umstand geschuldet, dass bisher weltweit noch kein ziviles Endlager für hoch radioaktive Abfälle in Betrieb ist.

lungsspielräume eröffnen, aber auch schließen, wenn es zum Konflikt über einen angemessenen Umgang mit ihnen kommt. Doppelte Komplexität führt zu einer großen Anzahl an möglichen Situationsdeutungen, d. h. zu klassischen Expertendilemmata³⁵. Bisherige Analysen im Transversalprojekt 2 (siehe auch Kapitel 5.2) zeigen auf, dass erstens ein konzeptioneller Dissens zur Entsorgungsstrategie besteht (geologische Tiefenlagerung mit oder ohne Option zur Rückholung), dass zweitens eine Uneinigkeit über die Interpretation des Falls Asse II besteht, drittens nur ein geringes Vertrauen in die Politik der Nuklear- und Energiewirtschaft vorhanden ist und viertens eine Vertrauenskrise gegenüber politischen Entscheidungsträgern entstanden ist, weshalb fünftens unterschiedliche Vorstellungen davon vorherrschen, welche Arten von Entscheidungen in der Entsorgung top-down getroffen werden sollten und bei welchen Entscheidungen die Öffentlichkeit auf welche Art mit eingebunden werden sollte. Darauf kann mit vier Handlungsoptionen reagiert werden: entweder in Form eines Nicht-Handelns, eines Durch-Schlingelns, eines Durch-Regierens (top-down) oder in Form eines Verhandelns (Hocke u. Renn, 2011). Hierbei wird erstens die Frage aufgeworfen, auf welcher empirischen Basis die Wahl der jeweiligen Handlungsoptionen begründet wird. Zweitens stellt sich die Frage, mit welcher Abfolge und mit welchem Maß an Offenheit Beratungen mit der interessierten Öffentlichkeit und Stakeholdern durchgeführt werden bzw. wann sie an welche offiziellen Entscheidungsprozesse und an welche Formen der Regulierung angebunden werden können. Erschwerend kommt an dieser Stelle hinzu, dass es sich bei der Verwahrung nuklearer Abfälle nicht nur um „Ewigkeitslasten“ handelt (Brunnengräber, 2015). Vielmehr verweist der Begriff des „wicked problem“ auch darauf, dass Politiker in ihren Handlungsperspektiven (i. d. R. Legislaturperioden) wenig Chancen haben, durch konstruktive Mitarbeit an einer voraussetzungsvollen „Problemlösung“ im politischen „Mehrebenen-System“ Anerkennung, Impact und in dieser Weise auch politischen Erfolg erreichen zu können (vgl. Di Nucci u. a. (2017)).

Erwartungen aus dem politischen Teilsystem selbst

Im repräsentativen Demokratiemodell wird die Prämisse der „Gleichheit aller“ verfolgt. D. h. den Interessen aller Bürger wird in Entscheidungsprozessen das gleiche Gewicht beigemessen – unabhängig von deren be-

³⁵Kuppler, S.; Hocke, P. (2016): Governance als Analysekonzept für die aktuelle Endlagerpolitik? Ein Problemaufriss. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“. Institut für Radioökologie und Strahlenschutz. Hannover, 02.02.2016.

ruflischer Rolle oder sozialer Stellung. Um dies gewährleisten zu können, wird der Repräsentativität der Volksvertreter eine besondere Bedeutsamkeit zugesprochen (Mbah, 2017). Entscheidungsprozesse dürfen folglich nicht von Minderheiten bestimmt werden ((Biegelbauer u. Hansen, 2011, S. 591f); (Saward, 2016, S. 2ff)). (Biegelbauer u. Hansen, 2011, S. 590f) sehen die repräsentative Demokratie als eine Zusammenfassung elitärer und pluralistischer Demokratietypen. Elitär meint hier, dass Partizipation nur durch regelmäßige Wahlen stattfindet und damit eine idealtypische Form des repräsentativen Demokratiemodells darstellt. Eine pluralistische Demokratie umfasst neben Wahlen weitere Partizipationsformen, die dazu dienen, an politischen Entscheidungen teilhaben zu können (beispielsweise durch die Mitgliedschaft und Mitarbeit in Interessenverbänden). Entscheidungsprozesse werden folglich von einer Gruppen- und Interessenvielfalt getragen (Biegelbauer u. Loeber, 2010, S. 6f).

In der jüngeren Forschungsliteratur wird kontrovers diskutiert, ob die repräsentative Demokratie noch fähig ist, den komplexen gesellschaftlichen Problemstellungen der Gegenwart und Zukunft adäquat zu begegnen und so angemessene Lösungen zu finden. Als Ausdruck dieser Forderung nach einem Wandel der repräsentativen Demokratie wird die wachsende Zahl an Bürgerinitiativen, Protesten und sozialen Bewegungen gesehen, die mehr Transparenz, Mitbestimmung und Demokratisierung fordern ((Geißel u. a., 2014, S. 13f); (Dalton, 2014, S. 37f)). Die Skepsis in Bezug auf die Funktionsfähigkeit der repräsentativen Demokratie äußert sich beispielsweise darin, dass politische Entscheidungen bei räumlichen Planungsprozessen in den vergangenen Jahrzehnten weniger von den Bürgern akzeptiert werden und häufiger in die Kritik geraten, mit der Folge, dass Entscheidungen zurückgenommen werden müssen, nicht getroffen werden oder aber gegen starken Protest durchgesetzt werden (Mbah, 2017). Alle drei genannten Optionen des Umgangs mit Entscheidungen sind unbefriedigend, da sie das eigentliche Problem nicht angehen: den politischen Entscheidungsprozess, der zunehmend seine legitime Basis verliert. Die Legitimität von Entscheidungen wird von Bürgern durch diese Erwartungen an die Umgestaltung politischen Entscheidens in Frage gestellt (Mbah, 2017). In einer repräsentativen Demokratie ist die Sicherstellung der Legitimität³⁶ prioritär, denn nur wenn eine Entscheidung nachvollziehbar und transparent ist, und unter Berücksichtigung verschiedener Argumente, basierend auf der repräsentativen Auswahl der Entscheidungsträger erfolgt ist, kann auch eine

³⁶Legitimität bezeichnet hier die Akzeptanz bzw. die Unterstützung politischer Entscheidungen durch die Bürger (Geißel, 2009, S. 403f), folglich den Geltungsanspruch, den politische Entscheidungsprozesse haben (Alcantara u. a., 2016, S. 25).

„individuelle Unterordnung unter die aufgestellten Normen (Gesetze) erwartet werden“ (Alcantara u. a., 2016, S. 25). Mittels Beteiligungsverfahren soll nicht nur ein demokratisches Ideal erfüllt, sondern insbesondere die Legitimität politischer Entscheidungen erhöht werden (Dryzek, 2010, S. 21). Die Politik und die Entscheidungsträger, deren politische Handlungsspielräume immer stärker durch internationale Abkommen und durch die Macht von Wirtschaftsunternehmen eingeschränkt werden, können jedoch dem steigenden Druck nach Partizipation, Repräsentation und Legitimation innerhalb der etablierten Ordnungsmodelle kaum gerecht werden (Mbah, 2017). (Lietzmann, 2016, S. 53) postuliert, dass „Repräsentanz und Akzeptanz [...] in dieser risikohaften Welt nur durch ausdrückliche und umfassende Entscheidungsbeteiligung der Betroffenen [erzeugt werden kann]. Nur durch Mitentscheidung entstehen auch Verantwortungsteilung und Akzeptanz für plötzlich eintretende Misserfolge“. Argumentativ unterlegt werden diese Aussagen damit, dass in modernen Gesellschaften mit hohem Bildungsstand, hoher Individualisierung und einer gewachsenen Orientierungsfähigkeit Individuen sich mehr als Unternehmer ihres Selbst begreifen und daher als Partner in politischen Entscheidungen wahrgenommen werden wollen (Lietzmann, 2016, S. 51ff). Das bedeutet, dass angesichts der bisher selten substantiellen Berücksichtigung der Bürgererwartungen in partizipativen Verfahren von zivilgesellschaftlichen Akteuren die Erwartung besteht, dass diese Bereitschaft zur Entscheidungsbeteiligung von den Entscheidungsträgern in den neuen Konstellationen auch eingeräumt wird.

Die Forderung nach Institutionalisierung neuer partizipativer Elemente erscheint naheliegend, um die politische Entscheidungsfindung wieder auf eine legitime Basis zu stellen. Insbesondere für Infrastrukturprojekte, bei denen extrem lange Zeithorizonte zu betrachten sind, wie das beispielsweise bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle der Fall ist, sind robuste Entscheidungsprozeduren unerlässlich. Hierzu gehört eine gewisse Planbarkeit und Verlässlichkeit, die nur mittels Institutionalisierung gewährleistet werden kann (Mbah, 2017).

Governance stellt somit eine Kombination unterschiedlicher Formen des Entscheidens dar, die nicht in Konkurrenz zueinander stehen sollen, sondern als Ergänzung gedacht werden. Wichtigste Charakteristika sind die (frühzeitige) Teilhabe von Stakeholdern in „deliberativen Foren“, d. h. politische Entscheidungen sollen nicht allein durch die gewählten Volksvertreter getroffen werden, sondern durch zusätzliche beratende Gremien (mit Vertretern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft). Willensbildungs- und Entscheidungsprozesse finden idealerweise durch inklusiven, öffentlichen Austausch von Argumenten zwischen allen Be-

troffenen und Interessierten als gleichberechtigten Akteuren statt (Geißel, 2011). Die Herausforderung, die sich dadurch für die repräsentative Demokratie ergibt, ist es einerseits eine umfassende Beteiligung an der Entscheidungsfindung zu ermöglichen und andererseits eine Verantwortungsübernahme zu gewährleisten, damit das Schutzgut nicht geschädigt wird bzw. im Falle eines Schadens die Verantwortlichkeiten klar benannt werden können.

Im Kontext der Endlagerung radioaktiver Abfälle erscheint eine Institutionalisierung partizipativer Elemente in den Entscheidungsfindungsprozess als unabdingbar. Dies begründet sich insbesondere vor dem Hintergrund der extrem langen Zeiträume und hinsichtlich ethischer Aspekte wie der Generationengerechtigkeit. Es ist nicht mehr ausreichend, die derzeit bestehende repräsentative Demokratie als eine Form der partizipativen Governance zu sehen und nur auf die Prozesse zu fokussieren, ohne die dahinterliegenden institutionellen Strukturen zu betrachten. Um Partizipation für alle Beteiligten zufriedenstellend auszugestalten und gleichzeitig nicht in Konkurrenz zum repräsentativen demokratischen System treten zu lassen, braucht es nicht unbedingt eine Einführung von mehr direktdemokratischen Elementen wie Volksabstimmungen, sondern eine Sicherstellung, dass erstens bisher bestehende partizipative Möglichkeiten umfänglich ausgeschöpft werden und zweitens auch die Ergebnisse partizipativer Prozesse Berücksichtigung in Entscheidungsprozessen finden (Mbah, 2017).

Erste Analysen zeigen, dass bei Radioactive Waste Management in Deutschland Formen der Information und Konsultation im Vordergrund stehen. Partnerschaftliche Aushandlung auf Augenhöhe und Formen des Interessenabgleichs sind selten und werden im Standortauswahlgesetz (StandAG) auch nicht eingefordert³⁷ (Gallego Carrera u. Hocke, 2016). Das neue StandAG ist in dieser Hinsicht vielmehr als ein erster Versuch zu werten, zumindest formal ein robustes Verfahren aufzustellen und damit eine Institutionalisierung von Partizipation in der Entsorgungspolitik voranzutreiben ((Hocke u. Smeddinck, 2017, S. 127); Smeddinck (2017b)). Allerdings bleibt das Gesetz bisher noch weit hinter ambitionierteren Partizipationsvorstellungen zurück. Bezüglich Entscheidungsverfahren zu komplexen Infrastrukturproblemen wie dem der Endlagerung ist es notwendig, Haltepunkte und Rückschritte im Entscheidungsprozess zu ermöglichen und so zu organisieren, dass die fachliche Grundlage deliberativ mit den Schlüsselakteuren des Standortauswahlverfahrens und der

³⁷Hocke, P. (2013): New Governance als Konzept zukünftiger Endlagerpolitik überholt? Bürgerbeteiligung und modernes Regieren. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“. Institut für Radioökologie und Strahlenschutz, Hannover, 17.12.2013.

interessierten Öffentlichkeit und den Stakeholdern umfassend abgeklärt wird (Mbah, 2017).

3.7.2 Politisches Entscheiden im Mehrebenen-System

Bisher wurde deutlich, dass sich modernes Regieren („Governance“) von traditionellen Formen des Regierens („Government“) unterscheidet. Auch im Ländervergleich hat sich gezeigt, dass klassische (top down) Steuerungsansätze nicht in der Lage sind, die existierenden Unsicherheiten und gesellschaftlich-sozialen Dimensionen des „wicked problem“ der Endlagerung angemessen zu berücksichtigen (vgl. (Brunnengräber u. a., 2014, S. 395) und Brunnengräber u. a. (2015)). Da die Umsetzung verschiedener Fachpolitiken nicht nur mit den verschiedenen Akteuren der Zivilgesellschaft und der interessierten Öffentlichkeit, sondern auch im föderalen Systemen wie der Bundesrepublik – deren zentrales Gliederungsprinzip das Territorium ist – eine Beteiligung unterschiedlicher politischer Ebenen voraussetzt (vgl. (Benz, 2010, S. 111)), wird im Rahmen der ENTRIA-Governance-Forschung insbesondere auch auf den Ansatz der „Multilevel Governance“ zurückgegriffen. Die Einteilung in territoriale politische Ebenen verweist zunächst einmal auf die Zuständigkeit von Organisationseinheiten für größere (z. B. Bundesland) oder kleinere Gebiete (z. B. Gemeinde). Sie rechtfertigt aber nicht zwangsläufig den Vorrang von Entscheidungen übergeordneter Organisationseinheiten und ist daher auch nicht mit hierarchischer Ordnung gleichzusetzen (vgl. (Benz, 2010, S. 111)). Mehrebenen-Systeme der Politik liegen vor, „wenn zwar die Zuständigkeiten nach Ebenen aufgeteilt, jedoch die Aufgaben interdependent sind, wenn also Entscheidungen zwischen Ebenen koordiniert werden“ müssen (Benz, 2010, S. 112). Ebenso wie die Energie- und speziell die Atompolitik ist auch die Entsorgungspolitik radioaktiver Abfälle grundsätzlich eine innenpolitische Angelegenheit souveräner Nationalstaaten. Die Innenpolitik von Nationalstaaten stellt also das zentrale politisch-administrative System dar, in dem zentrale Teile der nuklear- und entsorgungspolitischen Entscheidungen getroffen werden müssen. Allerdings bestehen auch Interdependenzen zwischen europäischen und internationalen Regulierungen, die „soft law“ darstellen können, aber wie die Richtlinie 2011/70 Euratom auch verbindliche Vorgaben machen³⁸. Soll der Gegenstand in seinem Gesamtzusammenhang verstanden werden, muss die nationale Entsorgungspolitik folglich als Teil eines komplexen Mehrebenen-Systems untersucht werden. Internationale Leitlinien und

³⁸Unter „soft law“ versteht man nicht verbindliche Übereinkünfte, Absichtserklärungen oder Leitlinien, vgl. (Raetzke, 2014, S. 670f).

Regelsysteme für den Umgang mit radioaktiven Reststoffen konturieren die nationalen Entsorgungskonzepte dabei ebenso wie bilaterale Verträge (z. B. zur Wiederaufarbeitung) oder supranationale Richtlinien zur Gestaltung und zur Umsetzung von Entsorgungsstrategien (vgl. Di Nucci u. Isidoro Losada (2015). Darüber hinaus bestehen von Staat zu Staat unterschiedliche kulturelle und diskursive Kontextabhängigkeiten, die sich sowohl auf das jeweilige Problemverständnis als auch auf den Umgang mit dem Problem auswirken. Die Spezifika der nationalen und subnationalen Ebenen verweisen darauf, dass die erforderlichen Entscheidungs- und Regelungsprozesse sowie die komplementären Koordinationsmechanismen nicht isoliert vom jeweiligen nationalen Kontext analysiert werden können.

Insgesamt kennzeichnen komplexe Wechselwirkungen zwischen Institutionen, Handlungsebenen sowie gesellschaftlichen Problemlagen die politischen Entscheidungsprozesse im Mehrebenen-System. Das Zusammenwirken staatlicher und privater Akteure auf unterschiedlichen Ebenen stellt dabei ein wichtiges Merkmal dar (Benz, 2010, S. 121). Der Multilevel-Governance-Ansatz eignet sich dafür, diese Governance-Strukturen aufzuzeigen, zu verstehen und zu analysieren, vgl. (Brunnengräber u. a., 2014, S. 396) und (Brunnengräber u. a., 2012, S. 63). Das Analyseinstrument geht dabei von zwei Grundannahmen aus: (1) dass die Vielfalt an staatlichen, privatwirtschaftlichen und zivilgesellschaftlichen Akteuren zunimmt und (2) dass die Strukturen und Prozesse von Politik, Recht und Ökonomie komplexer werden und die bekannten Ebenen und „Arenen“ der politischen Aushandlung erweitern (Brunnengräber u. a., 2014, S. 395)³⁹.

Mit einer solchen Zunahme von Ebenen und Akteuren können nicht nur erweiterte, sondern auch verengte Handlungsspielräume für die Akteure einhergehen, bspw. wenn der Handlungsspielraum des Staates durch das Agieren einer Vielzahl privater Akteure beschränkt wird. Kategoriale Zuordnungen wie privat-öffentlich oder lokal-global verlieren dabei insofern ihre Trennschärfe, als sich öffentliche und private Interessen ebenso wie nationale, regionale und lokale Ebenen aufgrund enger Wechselwirkungen kaum noch unabhängig voneinander betrachten lassen, vgl. (Brunnengräber u. a., 2014, S. 395).

Wicked problems wie das der Standortsuche bzw. die nukleare Entsorgung sind außerdem durch verschiedene Charakteristika gekennzeichnet, die auf die Schwierigkeiten verweisen, ein (nukleares) Problem in

³⁹Nach Benz (2010) werden mit Arenen Kontexte gemeint, die durch institutionelle Regeln definiert sind und in denen verschiedene Akteure aus unterschiedlichen Organisationen zur Erfüllung spezifischer Aufgaben zusammenwirken, vgl. (Benz, 2010, S. 112).

den staatlich vorgegebenen Mustern (Legislaturperioden, Fachpolitik als projektförmige Detailforschung mit schwachen soziotechnischen Komponenten, mehrfache inhaltliche Komplexitäten etc.) zu bearbeiten. Erstens ist das Problem durch hohe politische und kulturelle Kontextabhängigkeiten gekennzeichnet, weshalb es nie allein durch objektive Tatbestände (wie die Abfallmenge) erklärt werden kann. Zweitens kann es auch keine Blaupause für die Bearbeitung eines wicked problems geben, da soziale und technische Probleme ebenso wie verschiedene Teilsysteme und Handlungsebenen auf sehr komplexe Weise ineinandergreifen. Außerdem bewirken – drittens – die doppelte Gefahrenlage (safety / security), die Kosten, das systemische Risiko (Restrisiko), unüberschaubare Zeitskalen sowie eine konfliktive Akteurslandschaft, in der keine Einigkeit darüber besteht, was als Lösung akzeptiert wird, dass ein wicked problem erst ex post verstanden und durchdrungen werden kann. Für die wissenschaftliche Bearbeitung bedeutet dies viertens, dass wicked problems inter- und transdisziplinär bearbeitet werden müssen und nicht im Experiment oder Labor erprobt oder wiederholt werden können (Brunnengräber (2015), (Brunnengräber, 2016a, S. 148ff)).

Die Deutung von Problemen, die Verteilung von Kompetenzen, Ressourcen, Aufgaben und letztendlich von Entscheidungsbefugnissen auf unterschiedlichen Handlungsebenen (national, sub-national, international) sowie die stoffliche Seite des Problems müssen folglich in einem Wirkungszusammenhang gesehen und entsprechend analysiert werden (Brunnengräber u. a., 2014, S. 396). Dabei stellt sich vor allem die Frage, aufgrund welcher Interessen und mit welchem Ziel bestimmte (institutionelle) Ebenen gebildet werden bzw. welche Fragen und Sachverhalte auf welchen Ebenen verhandelt werden. Neben den Modi der Kooperation und Koordination in der Entscheidungsvorbereitung gilt es mit Blick auf die Mehrebenen-Governance darüber hinaus, institutionelle Arrangements, lokale Eigenheiten, akteursspezifische Eigenwilligkeiten sowie nationale Konfliktstrukturen und -kulturen zu betrachten (Brunnengräber u. Mez, 2014, S. 396). Für die Bewertung von Governance im Mehrebenen-System ist es zudem relevant, ob und in welchem Maße Politik dazu in der Lage ist, einen bestehenden Zustand beratungsorientiert zu öffnen und ob die damit einhergehenden, oft informell mitbestimmten politischen Entscheidungen der Schlüsselakteure von den Betroffenen (z. B. an Endlager-Standorten) akzeptiert oder toleriert werden (vgl. Benz (2010)).

Mit dem Konzept der Multilevel-Governance wurde in AP 2.2 die aktuelle Entsorgungspolitik aus Sicht der umweltpolitologischen Forschung untersucht. Im Zentrum der Analyse standen hierbei vier Dimensionen:

(a) die „Möglichkeitsdimension“, (b) die „Akteursdimension“, (c) die „Interdependenzdimension“ und (d) die „Mehrebenendimension“ (s. u.). Auf dieser Grundlage ließen sich unterschiedliche Politikinstrumente und Partizipationsverfahren (auch im internationalen Vergleich) beschreiben und analysieren, um darauf aufbauend „lessons learnt“ zu formulieren und Best-Practice-Lösungen zu identifizieren. Dafür wurde untersucht, wie verschiedene Akteure Probleme wahrnehmen, Problemlösungen adressieren, welche Interessen sie vertreten, welche Erwartungen sie haben und in welchem Maß der Wandel einer spezifischen Fachpolitik erfolgt (Häfner, 2016).

Governance, Policy-Instrumente und Institutionen

Regierungen führen mittels Policy-Instrumenten (staatlich initiierte Maßnahmen) politische Veränderungen herbei. Um politische Ziele umzusetzen, stehen unterschiedliche Maßnahmen zur Verfügung. Dazu gehören Gesetze, Verordnungen oder Anreizsysteme, die auch mit Blick auf die lange blockierte Entsorgungspolitik Neuanfänge einleiten und den staatlichen Akteuren die Möglichkeit eröffnen können, neue Koordinationsformen und Kooperationsverhältnisse einzurichten. Wie oben bereits erwähnt, folgt die nationale Politikgestaltung der Endlagerung zum einen Leitlinien und Regelsystemen, die auf globaler wie auch auf europäischer Ebene verhandelt wurden. Andererseits werden auf nationaler Ebene wichtige Verordnungen und Gesetze erlassen, die den Umgang mit den nuklearen Abfällen regeln sollen.

Internationale Ebene. Als wichtige internationale Organisationen sind die Internationale Atomenergie-Organisation (englisch: International Atomic Energy Agency, IAEA), die Nuclear Energy Agency (NEA) der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (englisch: Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) sowie die Internationale Strahlenschutzkommission (englisch: International Commission on Radiological Protection, ICRP) zu nennen. Die IAEA soll u. a. zur friedlichen Verbreitung der Atomenergie beitragen und verhandelte diesbezüglich das Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (englisch: Joint Convention on the Safety of Spent Nuclear Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management) (Brunnengraber u. a., 2015, S. 31f). Das Übereinkommen verpflichtet die Vertragsparteien u. a. dazu, nationale Anlagen nachzubessern, die den Anforderungen nicht entsprechen. Auf

Vertragsstaatenkonferenzen wird alle drei Jahre „überprüft, inwieweit die Zielsetzung des Gemeinsamen Übereinkommens erfüllt ist“, wozu „die Vertragsparteien jeweils einen Bericht vor(legen), in dem die nationalen Maßnahmen beschrieben werden“⁴⁰.

Damit liegt ein Instrumentarium vor, durch das auf das Sicherheitsniveau in den Mitgliedstaaten mittelbar Einfluss genommen werden kann. Zudem gibt die OECD/NEA bspw. Empfehlungen, Regeln und Richtlinien für den Umgang mit radioaktiven Reststoffen heraus, um die Mitgliedstaaten bei der Weiterentwicklung der wissenschaftlichen, technologischen und rechtlichen Grundlagen für eine sichere, umweltverträgliche und wirtschaftliche Nutzung der Kernenergie zu friedlichen Zwecken durch internationale Zusammenarbeit zu unterstützen⁴¹. Diese sind häufig sehr allgemein und meist unverbindlich und finden daher innerhalb der Nationalstaaten – wie der Ländervergleich zeigt – unterschiedlich hohe Beachtung (Di Nucci u. Isidoro Losada, 2015). Andere völkerrechtliche Vertragswerke, wie etwa die Aarhus-Konvention, werden in der Entsorgungspolitik bisher noch weniger als in anderen Umweltregimen umgesetzt (Brunnengräber, 2015, S. 88).

Europäische Ebene. Auch auf europäischer Ebene wurde früh ein Rechtsrahmen geschaffen, der für die Mitgliedsstaaten eine Vielzahl an Verpflichtungen enthält, aber nicht zwangsläufig und ausschließlich mit hartem, kodifiziertem Recht, sondern auch mit so genanntem „soft law“ (weichem Recht) ausgestattet ist (Brunnengräber, 2015, S. 87)(Brunnengräber 2015, S. 87). So fordert auch die EU-Richtlinie 2011/70/Euratom eine funktionale Trennung der Regulierungsbehörde von den Betreibern (Brunnengräber, 2015, S. 88). Die EU-Richtlinie, die im September 2011 verabschiedet wurde, bezeichnet zudem die geologische Tiefenlagerung als „sicherste und ökologisch tragfähigste Option“ für die „Endlagerung“ hoch radioaktiver Abfälle und verbrauchter Kernbrennstoffe (vgl. (Brunnengräber, 2015, S. 88f)). Außerdem sollen die Mitgliedsstaaten die Öffentlichkeit effektiv über ihr Vorgehen informieren und allen betroffenen Interessengruppen, einschließlich der lokalen Gebietskörperschaften

⁴⁰Für weitere Informationen zum Gemeinsamen Übereinkommen siehe: <http://www.bmu.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/nukleare-sicherheit/internationales/internationale-uebereinkommen/gemeinsames-sicherheitsuebereinkommen/> (eingesehen am 11.04.2018).

⁴¹Für weitere Informationen zur OECD/NEA siehe: <https://www.oecd-neo.org/general/about/> (eingesehen am 27.03.2018).

und der Öffentlichkeit, die Möglichkeit geben, sich an Entscheidungsprozessen zu beteiligen⁴².

Die Richtlinie weist den Mitgliedsstaaten zwar die abschließende Verantwortung für die Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle zu. Dennoch besteht durchaus auch die Möglichkeit, gemeinsame internationale Lösungen voranzutreiben. Dies lässt sich am Beispiel der Vorschläge verdeutlichen, die innerhalb der European Repository Development Organisation diskutiert werden (vgl. (Di Nucci u. Isidoro Losada, 2015, S. 87f)). Neben internationalen Sicherheitsstandards und supranationalen Richtlinien zeigen auch bilaterale Verträge einzelner Länder mit den Wiederaufarbeitungsanlagen in Großbritannien oder Frankreich, dass nationale Entsorgungsprobleme in eine komplexe Mehrebenen-Politik eingebettet sind (Brunnengräber, 2015, S. 89). Die Konflikte um die Rückholung einer kleineren Zahl von Behältern mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung nach Deutschland verdeutlichen, dass selbst kleine Mengen zu entsorgender Abfälle zu erheblichen innenpolitischen Konflikten führen können. Diese Konflikte schienen über einige Monate hinweg die Verabschiedung des StandAG zumindest zu verzögern, wenn nicht zu gefährden (s. u.).

Nationalstaatliche Ebene. Da die Verantwortung für die Entsorgung abgebrannter Kernbrennstoffe letztlich bei den einzelnen Staaten liegt, die den Atom Müll erzeugen, spielt die nationalstaatliche Ebene eine herausragende Rolle. Von Staat zu Staat lassen sich diesbezüglich sehr unterschiedliche Herangehensweisen finden, die nicht allein auf gesetzliche Rahmenbedingungen, gesellschaftspolitische Dimensionen oder geologische Gegebenheiten zurückzuführen sind (Brunnengräber, 2015, S. 89). Vielmehr gibt es schon auf nationaler Ebene Besonderheiten im politischen Verhältnis von Bund, Ländern, Regionen oder Kommunen, die mit unterschiedlich ausdifferenzierten Aufgaben- und Zuständigkeitsbereichen, Kompetenzen und gesetzlich geregelten Entscheidungsbefugnissen einhergehen. Dies ist einer der Gründe dafür, dass sich Standortsuchprozesse sehr unterschiedlich gestalten können. Die gesetzliche Grundlage der Entsorgung bilden in Deutschland das Atom- und das Strahlenschutzgesetz (mit letzterem wurde die EU-Richtlinie 2013/59/EURATOM in nationales Recht umgesetzt) sowie das StandAG.

Dieses Regelwerk führt aber nicht dazu, dass sich bei der Standortsuche äußerst vielschichtige und auch widerstreitende Interessen artikulieren, und dabei den gesetzlichen Rahmen als „höhere“ Rationalität aner-

⁴²<http://www.bfs.de/SharedDocs/Stellungnahmen/BfS/DE/2011/02-17-eu-richtlinie.html> (eingesehen am 15.11.2017).

kennen. Politische oder ökonomische Interessen der organisierten Akteure überschatten oft die Orientierung an sozial-ökologischen Notwendigkeiten oder naturwissenschaftlichen Erkenntnissen (Brunnengräber u. a., 2012, S. 64). Erwartungen an Partialinteressen stehen über dem nationalen Interesse, zeitnah eine robuste Lösung im tiefen Untergrund zu verwirklichen. Das ENTRIA-Akteursscreening (Häfner, 2016) zeigt einerseits wie ausgesprochen breit das Akteursspektrum ist, aber auch welche Akteursklassen sich im Konflikt um die richtige Entsorgungen gegenüberstehen. Neben den politisch/staatlichen Institutionen sind Soziale Bewegungen und Umwelt-Nichtregierungsorganisationen die beiden Klassen mit der größten Zahl an Playern.

Governance und Instrumente bei der nuklearen Entsorgung

Die oben beschriebenen Policy-Instrumente (S. 182) auf den verschiedenen Governance-Ebenen verändern sich im Laufe der Zeit und entfalten unterschiedliche Wirkungen und Folgewirkungen auf den Umgang mit radioaktiven Abfällen in der Bundesrepublik Deutschland. Im Folgenden wird ein kurzer historischer Abriss der Entsorgungspolitik in Deutschland vor dem Jahr 2011 gegeben. Darauf aufbauend wird auf neuere Entwicklungen und veränderte Rahmenbedingungen eingegangen.

Neuer Referenzrahmen. Das Versagen des Staates (vgl. Jänicke (1987)) im Bereich Endlager-Governance kann u. a. auf frühere politisch-administrative Steuerungskonzepte und die lang bestehende Mehrfach-Rolle staatlicher Institutionen als Förderer (und Initiator) und gleichzeitig Regulierer im Bereich der Kernenergie sowie als Verantwortliche für die Entsorgung zurückgeführt werden. Auf diese Weise wurde eine neutrale moderierende Position des Staates z. B. in Bezug auf lokale Proteste unmöglich (Häfner, 2016, S. 183). Außerdem wurde die Endlagerung über Dekaden primär als technisches Problem angesehen, das mit überschaubarem technischen Aufwand zu lösen sei (Brunnengräber, 2016b, S. 23). Generell fokussierte der Endlager-Dialog stark auf technisch-wissenschaftliche Fragen, ein Raum für die Debatte gesellschaftspolitischer Aspekte wurde nicht geschaffen (Kuppler, 2017). Die mangelnde Akzeptanz in der Bevölkerung wurde vor allem auf Wissensdefizite zurückgeführt (Enquete-Kommission, 1980). Erst vor dem Hintergrund dieser technologischen Dominanz wird verständlich, dass die Entsorgungspolitik seit den 1970er Jahren zu erheblichen Konflikten führte. Die gesellschaftliche Polarisierung ist Teil des „wicked problems“ und wirkt folglich bis heute auf die Entsorgungspolitik ein.

Einen Anlauf dafür, den Konflikt der politisch-technokratischen Entscheidung um den Endlagerstandort Gorleben zu entschärfen, wurde in der Bundesrepublik bereits 1998 mit der Einberufung des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) unternommen, der u. a. Kriterien für die Standortauswahl entwickeln sollte (vgl. (Brunnengräber u. a., 2014, S. 397)). Der AkEnd legte im Dezember 2002 seinen Abschlussbericht vor, in dem u. a. die Beteiligung einer breiten Öffentlichkeit anempfohlen wurde, um mit den relevanten Interessengruppen und der Öffentlichkeit einen Konsens über den Weg zur Auswahl eines Endlagerstandortes zu erarbeiten (Bundesamt für Strahlenschutz (2002); Mez (2006), (Brunnengräber u. a., 2014, S. 397)). Die Empfehlungen des Berichtes wurden zunächst nicht aufgegriffen, obwohl die jahrzehntelangen Kämpfe um die Atomenergie und um Gorleben gezeigt haben, dass nur unter Beteiligung der Öffentlichkeit solche Suchprozesse initiiert werden können (Di Nucci u. a. (2017); Hocke u. Gloede (2006); (Brunnengräber, 2015, S. 123)). Letztlich ist es damals nicht gelungen, mit und zwischen Politik, der interessierten Öffentlichkeit und der Energiewirtschaft einen breiten öffentlichen Diskurs zu initiieren. Auch (partei-)politische Prozesse stießen dabei an ihre Grenzen: Die Positionen der unterschiedlichen Interessengruppen waren verhärtet, die Konfliktlinien starr ausgeprägt, sodass keine Fortschritte erzielt werden konnten ((Brunnengräber u. a., 2014, S. 397); Hocke u. Renn (2011)).

Heute stoßen unterschiedliche neue Ansätze der Problemlösung in verschiedenen Staaten auf ganz neue Probleme (Schreurs u. a., 2014); sie haben aber eines gemeinsam: Sie nehmen ein weitaus breiteres Akteursumfeld in den Blick und verstehen das Standortauswahlverfahren und alle damit zusammenhängenden Maßnahmen der Entsorgungspolitik als Prozess der gesellschaftlichen Teilhabe. In Deutschland wurde ein (neues) Gelegenheitsfenster nach dem beschlossenen Atomausstieg eröffnet, als Konsequenz aus dem Kernreaktorunfall von Fukushima (Frühjahr 2011). Der derzeitige gesellschaftliche Prozess war erst innerhalb des neuen Referenzrahmens der Energiewende möglich – in der Auseinandersetzung mit dem wicked problem greifen somit die Energiewende hin zu erneuerbaren Energien und die „Zeit des Aufräumens“ der fossil-nuklearen Hinterlassenschaften ineinander (Brunnengräber u. a., 2014, S. 393).

Bund-Länder-Verhältnis. Die Verflechtung der unterschiedlichen politischen Handlungsebenen (international, national, subnational) kann dabei insbesondere auf der nationalen Ebene zu erheblichen Kompetenzstreitigkeiten sowie Interessen- und Verteilungskonflikten führen. Diese können sowohl zwischen den verschiedenen territorialen Ebenen als auch

zwischen den unterschiedlichen Akteursgruppen wie Ministerien, Parteien, der Privatwirtschaft oder wissenschaftlichen Einrichtungen auftreten (vgl. (Brunnengräber, 2015, S. 91). Institutionelle Arrangements spielen dabei gleichermaßen wie akteursspezifische Eigenwilligkeiten und nationale Konfliktstrukturen und -kulturen eine erhebliche Rolle.

Die Atompolitik ist in der Bundesrepublik schon seit jeher von Kompetenzstreitigkeiten zwischen Bund und Ländern geprägt. Zuletzt waren derartige Spannungen im Bund-Länder-Verhältnis in den Jahren 2013/2014 zu beobachten, als die Frage der Rückführung und Verteilung der letzten 26 deutschen Castor-Behälter aus der Wiederaufarbeitung in Frankreich und Großbritannien auf hiesige Zwischenlagerstandorte zur Debatte stand. Während die Bundesländer Baden-Württemberg und Schleswig-Holstein ihre Bereitschaft zur Aufnahme eines Teils der Behälter in die standortnahen Zwischenlager erklärten, lehnten Hessen und Bayern dies zunächst ab (Drögemüller, 2016, S. 191). Bundesumweltministerin Barbara Hendricks (SPD) appellierte daraufhin an die Solidarität der Bundesländer (vgl. (Brunnengräber, 2015, S. 91)) und Bayern erklärte sich Ende 2015 erst aufgrund des Drucks durch das Bundesumweltministerium zur Aufnahme von sieben Castoren bereit. Während es in diesem Fall „nur“ um die Zwischenlagerung hoch radioaktiver Reststoffe ging, sind bei der Endlagerung mindestens ähnliche politische Konflikte zu erwarten⁴³.

Auch Spannungen zwischen verschiedenen Wirtschaftssektoren, wie sie etwa bei der Standortsuche für AKW zwischen den Kernreaktoren betreibenden Energiekonzernen auf der einen und der kommunalen Wasserwirtschaft, der Tourismusbranche oder der Landwirtschaft auf der anderen Seite aufgetreten sind, sind dabei nicht unwahrscheinlich (Brunnengräber, 2015, S. 91).

AKW-Betreiber. Für die AKW-Betreiber gilt eigentlich das Verursacherprinzip der Umweltpolitik. Das Prinzip, nachdem diejenigen, die den Atom Müll produzieren, diesen auch ordentlich einlagern müssen, wurde über die Rückstellungen für die Stilllegung, den Rückbau und die Entsorgung zwar bilanztechnisch erfüllt. Die Realisierung der eigentlichen Endlagerung wurde durch Stop-and-Go-Policy⁴⁴ aber immer wieder verzögert und im Endeffekt in die Zukunft verschoben (Brunnengräber u. a., 2016, S. 298). Eine vergleichende Standortsuche wurde von den Betrei-

⁴³Vgl. die Partialinteressen, die die Bundesländer Bayern und Sachsen bei der Endlagerkommission einbrachten (Endlagerkommission, 2016).

⁴⁴Der Begriff wurde in einer Studie von (Rütter u. a., 2005, S. 113) im Zusammenhang mit Deutschland eingeführt.

bern und vom Staat als unnötig erachtet, sie wurde in jedem Fall nicht proaktiv vorangetrieben⁴⁵. Erwartungen und Widersprüche aus der Zivilgesellschaft zu unterschiedlichen Sachfragen wurden als wenig bedeutsam eingestuft und die Lösung des Sachproblems letztlich auf die lange Bank geschoben. Fehlentscheidungen, Verzögerungen und politischer Disput zwischen Parteien oder zwischen Bund und Ländern taten ihr Übriges. Ausnahmen bildeten die politischen Reaktionen, zu denen der Widerstand gegen die CASTOR-Transporte ins Wendland führte. Doch der über Jahrzehnte bestehende staatlich-industrielle Atomkomplex (Brunnengräber u. a., 2016) löst sich derzeit auf. Dies lässt sich aufzeigen, (1) anhand der Klagen der Energieversorgungsunternehmen (EVU) wegen Schadensersatz für den Atomausstieg, (2) anhand der Neuregelung der Finanzierung des Atomausstiegs wie die Einrichtung eines staatlichen Fonds, in den größtenteils die Rückstellungen der AKW-Betreiber eingezahlt werden, sowie (3) anhand des rasanten Verlusts an Marktmacht und der operativen Umstrukturierung der Energiekonzerne im Zuge der Energiewende (vgl. (Brunnengräber u. a., 2016, S. 298f)).

Die Anti-Atom-Bewegung. Darüber hinaus entwickeln NGOs, soziale Bewegungen oder Bürgerinitiativen neue Perspektiven auf das Problem: In den Forderungen werden häufig Aspekte von Demokratie und politischer Teilhabe oder Fragen zum Ende des fossilen Zeitalters, der Gerechtigkeit oder neuer Lebensstilformen angesprochen und damit Dimensionen berührt, die die Konsensorientierung oder das Treffen von Entscheidungen auf streng wissenschaftlich-akademischer Grundlage an Grenzen führt (Brunnengräber u. a., 2012, S. 64). Auch unterschiedliche Risikowahrnehmungen sind dabei von erheblicher Bedeutung. Die jahrzehntelangen Auseinandersetzungen zwischen staatlichen Institutionen und der Anti-Atom-Bewegung verweisen vor allem auf drei Problemstellungen jeder deutschen Endlager-Governance: erstens eine deutlich unterschiedliche Risiko- und Gefahrenwahrnehmung verschiedener Akteure, zweitens das entstandene Misstrauen zwischen Teilen der Zivilgesellschaft und staatlichen aber auch wissenschaftlichen Institutionen und drittens die bestehenden Unsicherheiten bei der Einlagerung und die langen Zeiträume der Problembearbeitung.

⁴⁵ Worin die Ursachen für diese Stagnation lagen, ergibt sich nicht eindeutig, (Hocke, 2006, S. 246) spricht von einer Entscheidungsblockade, die über weite Phasen diese beiden Jahrzehnte prägte und eine substantielle Auseinandersetzung mit den verschiedenen Vorschlägen (z. B. des AkEnd 2003) zum Aufbrechen desselben verhinderte. Unter Verweis auf Brunnengräber u. a. (2016) kann auch dieses Nicht-Handeln angesichts der realen Option eines standortvergleichenden Auswahlverfahrens als bewusste politische Tabuisierung oder Ignorieren fachlicher Alternativen verstanden werden.

Resümee. Die komplexen und Ebenen übergreifenden Governance-Strukturen lassen insgesamt erkennen, dass im politischen Prozess der Regulierung der Endlagerpolitik keineswegs von einem einheitlichen Problemverständnis ausgegangen werden kann. Bereits die Problemdefinition, die gesellschaftliche Wahrnehmung und auch die mediale Aufbereitung des Problems sind höchst divergent: Für die Bevölkerung in der Region, in der ein Endlager projektiert wird, stehen das Risiko, die Gesundheit oder Grundstückspreise im Vordergrund; für die Energieunternehmen die Kosten, die zu veranschlagen sind; für die Behörden und Ministerien die Verständigung auf politische Verfahren und Institutionen. Dabei sind die Endlagerpolitik und das damit zusammenhängende Standortauswahlverfahren kein hierarchiefreier Prozess. Den Bewegungsspielraum legen vor allem jene fest, die in den zentralen Institutionen und Akteursnetzwerken tätig sind und über die entsprechenden Ressourcen verfügen. Beim Festlegen des Verfahrens, der zentralen Handlungsbereiche und der politischen Regulierung treten die etablierten politischen Akteure in den Vordergrund, deren Präferenzen, Interessen und Handlungslogiken aber im Widerspruch zu jenen der Zivilgesellschaft stehen können. Je nach Perspektive gehen die Vorstellungen auseinander, und doch müssen sie – um wicked problems zu lösen – im politischen Prozess zusammengeführt werden (Brunnengräber u. a., 2014, S. 397). Dabei hat es erste Fortschritte gegeben. In das Verhältnis zwischen Staat und Zivilgesellschaft und zwischen den unversöhnlichen Konfliktparteien zur Atomenergie und Nuklearpolitik ist nicht zuletzt durch den Kernreaktorunfall von Fukushima und den darauf folgenden Atomausstieg zumindest Bewegung gekommen. Gerade in diesem Punkt zeigt sich die Kontextabhängigkeit des wicked problems ‚Endlagersuche‘. So wurde mit der Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes (StandAG) vom 28. Juni 2013 im Deutschen Bundestag in der Folge die technische Pfadabhängigkeit einer einseitig auf geologische Tiefenlager in Steinsalz ausgerichteten Forschungspolitik in Teilen revidiert (vgl. (Häfner, 2016)). Die 2014 eingerichtete Endlager-Kommission stellt einen weiteren Versuch einer Reorientierung der Endlagerpolitik dar, der aufgrund des gesetzgeberischen Handelns und der letztendlichen Verabschiedung des StandAG in mehreren Schritten als Neuanfang interpretiert werden kann.

Bei ihrer konstitutionellen Sitzung 2014 hat sie ausdrücklich betont, auf die Vorarbeit des AkEnd aufzubauen, der eine systematische und auf Transparenz beruhende Erarbeitung von Kriterien bei der Standortauswahl zum Ziel hatte. Auch der öffentlichen Beteiligung wurde damals schon eine große Bedeutung zugesprochen. Mehrere Standorte sollen miteinander verglichen werden (Brunnengräber, 2015, S. 123).

Verschiedenen NGOs und Anti-Atom-Initiativen gingen die Schritte der Regierung und des Parlaments 2013/14 allerdings nicht weit genug. Sie versuchten, eine Fundamentalopposition gegenüber der neuen Endlagerpolitik aufzubauen, die mit der ersten Fassung des StandAG (2013) gestartet wurde. Diese Akteure waren jedoch nicht ausreichend mobilisierungsstark, weshalb sich einige nuklearkritische Organisationen in die neuen Beratungen zum Standortauswahlverfahren konstruktiv und kritisch einbrachten. Aus funktionaler Perspektive ist festzuhalten, dass bis heute durch die außerparlamentarische Kritik der Diskurs um die nukleare Entsorgung bereichert wurde. Die Zielerreichung, einen Standort für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle zu finden, könnte dies wahrscheinlicher machen. Insofern wird es zentral darauf ankommen, den gesellschaftlichen Prozess so zu gestalten, dass Neujustierungen und Reformulierungen der Lösungsansätze dauerhaft möglich sind (Brunnengräber u. Mez, 2014, S. 397). Ohne Teile der nuklearkritischen Öffentlichkeit und ihrer Organisationen einzubinden, dürfte dies jedoch nur schwer gelingen.

Zur Durchführung der EU-Richtlinie 2011/70/EURATOM ist mittels StandAG auch eine Neuordnung der bestehenden institutionellen Strukturen und Verfahren erfolgt, um die geforderte funktionale Trennung der Überwachungs- und Genehmigungsbehörde von allen anderen mit der Entsorgung befassten staatlichen Stellen oder Organisationen zu gewährleisten (vgl. (Brunnengräber, 2015, S. 89)). Dem neu gegründeten „Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit“ (BfE)⁴⁶ kommt die Rolle der Aufsichts- und Genehmigungsbehörde zu, während die neu eingerichtete „Bundesgesellschaft für Endlagerung“ (BGE) als Vorhabenträger die zentrale Verwaltungsinstanz im Standortauswahlprozess sein wird (vgl. (Brunnengräber, 2015, S. 120f))

Laut StandAG soll das BfE die Öffentlichkeitsbeteiligung in allen Phasen des Verfahrens organisieren. Bei einem weit gefassten Begriff substantieller Öffentlichkeitsbeteiligung, der von einer gemeinsamen Problemdefinition ausgeht, müsste dies eigentlich Vorfestlegungen wie die Einrichtung von Bundesbehörden und Kommissionen ausschließen⁴⁷.

Wenn eine Öffentlichkeitsbeteiligung die gehaltvolle Mitwirkung der Bürgerinnen und Bürgern am Entscheidungsprozess als unabdingbar ansieht, hätte bereits die Institutionalisierung in einem transparenten, offenen Verfahren erfolgen müssen. Damit wären demokratische Anforde-

⁴⁶Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesumweltministeriums.

⁴⁷Ein systematische Bearbeitung der Problemdefinition wird aus verschiedenen einschlägigen Disziplinen bei Technikkonflikten für dringend notwendig gehalten (vgl. für die Technikfolgenabschätzung (Grunwald, 2008, S. 174), sowie für Ansätze der transdisziplinären Forschung (Krohn u. a., 2017, S. 343)).

rungen gestellt, die über die liberal-repräsentative Praxis der Demokratie deutlich hinausweisen. Der proklamierte „Neuanfang“ mittels des neuen Standortauswahlverfahrens ist also real ein nur bedingter Neuanfang. Er reproduziert bestehende Machtverhältnisse (Brunnengräber u. Häfner, 2015) und macht nicht deutlich, wie mit dem Spannungsverhältnis zwischen repräsentativer und deliberativer Demokratie umgegangen wird (Röhlig u. a., 2014).

Während sich die Umsetzung der Öffentlichkeitsbeteiligung im Endlagerbereich vor dem StandAG vor allem an planungsrechtlich vorgesehenen bzw. formal-institutionalisierten Beteiligungsinstrumenten orientierte (z. B. Anhörungen, Erörterungstermine), sollen zukünftig neue Wege der Beteiligung beschritten und erweiterte Beteiligungskorridore geschaffen werden. Die Öffentlichkeitsbeteiligung soll dabei durch verschiedene Maßnahmen umgesetzt werden, um jeweils unterschiedliche Aufgaben und Funktionen erfüllen zu können (kritisch dazu Hocke u. Smedinck (2017)).

Zur vermittelnden, unabhängigen und gemeinwohlorientierten Begleitung des Prozesses der Standortauswahl wurde ein pluralistisch zusammengesetztes Nationales Begleitgremium (NBG) eingerichtet und mit anerkannten Persönlichkeiten des öffentlichen Lebens sowie Bürgerinnen und Bürgern besetzt⁴⁸. Das NBG kann Einsicht in alle Unterlagen einfordern sowie Stellungnahmen und Empfehlungen abgeben⁴⁹.

Auch wenn das Standortauswahlgesetz in undeutlicher Weise dem NBG lediglich eine „vermittelnde und unabhängige Begleitung des Standortauswahlverfahrens, insbesondere der Öffentlichkeitsbeteiligung“ (§ 8, Abs. 1 StandAG) zuspricht, fungiert es nach seiner gelebten Praxis und damit seinem Selbstverständnis in gewisser Weise auch als Schlichtungsstelle im Verfahren. Es nutzt also den Spielraum, den die wenig präzisen Begriffe „Vermittlung“ und „Öffentlichkeitsbeteiligung“ aufweisen, um auf Probleme des Verfahrens zu reagieren. Es bleibt aber festzuhalten, dass es damit ebenso wie insbesondere das BfE, aber auch die BGE Maßnahmen zur Öffentlichkeitsbeteiligung ergreift⁵⁰. Damit wird die Frage

⁴⁸Während die sechs anerkannten Persönlichkeiten des öffentlichen Lebens von Bundestag und Bundesrat berufen wurden, wurden die drei Bürgerinnen und Bürger in einem Teilnahmeverfahren nominiert und von der Bundesumweltministerin ernannt. Bis Mitte 2018 soll die Zahl der Mitglieder von neun auf 18 verdoppelt werden; siehe: http://www.nationales-begleitgremium.de/DE/Begleitgremium/begleitgremium_node.html (eingesehen am 07.12.2017).

⁴⁹Aufgaben des NBG siehe: http://www.nationales-begleitgremium.de/DE/Begleitgremium/Aufgaben/aufgaben_node.html (eingesehen am 07.12.2017).

⁵⁰Die BGE „informiert die Öffentlichkeit über die im Rahmen des Standortauswahlverfahrens von ihm vorgenommenen Maßnahmen“ (§ 3 Abs. 2 StandAG). Allerdings wird in verschiedenen Studien zur Öffentlichkeitsbeteiligung auch das bloße Informieren als

nach der Kohärenz der verschiedenen Maßnahmen zur Öffentlichkeitsbeteiligung aufgeworfen.

Sobald die BGE im ersten Schritt des Verfahrens Teilgebiete ermittelt hat, werden im nächsten Schritt Regionalkonferenzen in den als obertätig untersuchungswürdig eingestuften Teilgebieten eingerichtet werden (§ 10 Abs. 1 S. 1 StandAG). Die Hauptaufgabe der Regionalkonferenzen wird darin gesehen, sämtliche Verfahrensschritte kritisch und konstruktiv zu begleiten (vgl. (Drögemüller u. Kuppler, 2017, S. 123)). Werden von den Regionalkonferenzen Mängel in den Vorschlägen der BGE zu den obertätig und untertätig zu erkundenden Regionen bzw. im abschließenden Standortvorschlag festgestellt, sind die Regionalkonferenzen außerdem dazu berechtigt, zu jedem der genannten Vorschläge jeweils einen Nachprüfauftrag an das BfE zu richten. Ergibt sich aus der Nachprüfung anschließend Überarbeitungsbedarf, „fordert das BfE den Vorhabenträger auf, den jeweiligen Vorschlag vor Durchführung des Stellungnahmeverfahrens nach § 7 Abs. 1 zu ergänzen; es gibt der die Nachprüfung auslösenden Regionalkonferenz Gelegenheit zur Stellungnahme“ (Hocke u. Smeddinck, 2017, S. 127). Vertreterinnen und Vertreter der Regionalkonferenzen sollen sich überdies mit Vertreterinnen und Vertretern der Zwischenlager-Regionen in einem parallel einzurichtenden Rat der Regionen beratschlagen (§ 11 StandAG).

Erste Analysen zeigen, dass die komplexe Gemengelage unterschiedlicher Zuständigkeiten, Interessen, Wertvorstellungen und Problemdefinitionen in der Mehrebenen-Governance der „Endlagerung“ genügend Stoff für politische Kontroversen und soziale Konflikte liefert. Die Prozesse zu einer Standortauswahl für die Lagerung radioaktiver Abfälle können daher nicht durch einen eng definierten Planungsansatz gesteuert werden, in dem rein technische Probleme und Problemlösungen definiert und in aufeinanderfolgenden Schritten gelöst werden (Di Nucci, 2016, S. 137). Die Ebenen übergreifenden Prozesse und die divergierenden Interessen erfordern vielmehr reformierte oder gar neue gesellschaftliche Institutionen und Aushandlungsverfahren („new forms of governance“) ((Brunnengräber u. a., 2014, S. 395); Kuppler u. Hocke (2018)).

Die Bereitschaft der interessierten Öffentlichkeit und der Bevölkerung in den potenziellen Standortregionen, ein Endlager in ihrer Umgebung zu akzeptieren oder wenigstens zu tolerieren, hängt letztlich von vielen Schlüsselfaktoren ab: (1) von Art und Umfang der angebotenen Beteiligung, (2) von Informationen und Wissen über den Atommüll, seine Ent-

Maßnahme der Öffentlichkeitsbeteiligung bezeichnet, die jedoch nicht die Form des zugesagten Dialogs mit der interessierten Öffentlichkeit erfüllt (Arnstein, 1969; Di Nucci u. a., 2017; DAEF, 2016).

sorgung und optionale Lösungsansätze sowie (3) von persönlichen Wahrnehmungen und (4) der Glaubwürdigkeit der zuständigen Behörden und Entsorgungsunternehmen (Di Nucci, 2016, S. 125). Vor diesem Hintergrund erscheint es unumgänglich, dass staatliche Entscheidungsbefugnisse teilweise abgegeben werden müssen – etwa an zivilgesellschaftliche Gremien außerhalb des Regierungshandelns. Dazu zählt auch, dass diese Gremien Akteneinsicht und Einfluss auf das Ergebnis des Verfahrens nehmen können sowie Informationsfreiheit entsprechend der Aarhus-Konvention erhalten. Der Zugang zu Rechtsschutz, Ressourcen und Kontrollfunktionen gehört etwa hierzu. Diesbezüglich konkrete und praxistaugliche Verfahrensregeln sowie eine Kultur des politischen Dialogs müssen aber erst noch geschaffen werden, damit die Standortsuche Erfolg versprechend verlaufen kann (Brunnengräber, 2015, S. 144). Neben der erfolgten weitgehend formellen Institutionalisierung der Standortsuche durch das StandAG könnte der Beteiligungsprozess präzisiert und an die Erwartungen der interessierten Öffentlichkeit angepasst werden. Dies könnte zuerst auf der gesetzgeberischen Ebene geschehen, aber auch (wie z. B. in der Schweiz) durch eine flexible und der Öffentlichkeit zugewandten Politik. So könnte die gesetzgeberische Ebene in einem stufenweisen Prozess sowohl die national agierenden Stakeholder als auch die Zivilgesellschaft einbeziehen und weitere Gesetzesmaßnahmen zur Verstetigung und qualitativen Absicherung eines hochwertigen Beteiligungsprozesses bei der Standortsuche beitragen ((Brunnengräber, 2016b, S. 19), Kuppler (2016, 2017)).

3.7.3 Exkurs: Erwartungen ausgewählter Akteure an Governance

Erwartungen von Kommunalpolitikerinnen und -politikern und Vertreterinnen und Vertretern von Bürgerinitiativen an eine „gute“ Entsorgungspolitik

Die Standortsuche, geowissenschaftliche Erkundungen, Beteiligungsprozesse und die Errichtung und der Betrieb und Verschluss eines Endlagers werden sich ebenso wie einhergehende Überwachungsmaßnahmen und etwaige Maßnahmen zur Rückholung der Abfälle unmittelbar auf die Standortregion und Lebenswelt der lokalen und regionalen Bevölkerung auswirken. Da die regionale Ebene zukünftig also eine zentrale Rolle spielen wird, wurde eine Gegenwartsanalyse durchgeführt, die die Bewertung von Entsorgungsoptionen und -strategien aus Sicht kommunaler Entscheidungsträgerinnen und -trägern sowie Vertreterinnen und Ver-

tretern von Bürgerinitiativen (BI) in den Blick nimmt. Das Ziel bestand einerseits darin, die vorhandene Forschungslücke zu füllen, die bei dem Erfassen regionaler Meinungen, Erfahrungen und Präferenzen besteht. Gleichzeitig wurde das Ziel verfolgt, neue Formen der Governance für eine moderne Entsorgungspolitik und die damit verbundene Öffentlichkeitsbeteiligung zu entwickeln (Drögemüller (2018), siehe auch Kapitel 5.2).

Im Rahmen der Analyse wurde danach gefragt, (1) wie die Akteure aus bisher von End-/Zwischenlagern betroffenen sowie zukünftig ggf. betroffenen Regionen die Entsorgungspolitik bewerten, (2) was sie von einer „guten“ Entsorgungspolitik erwarten und (3) wie sie verschiedene Entsorgungsoptionen bewerten (Drögemüller, 2018).

Die Ergebnisse der Interviewauswertung zeigen, dass sich die befragten Entscheidungsträgerinnen und -träger sowie BI-Vertreterinnen und -Vertreter ein breites Kontextwissen zum Konfliktfeld angeeignet haben. Dieses Kontextwissen bezieht sich gleichermaßen auf die zeitgeschichtlichen, politisch-rechtlichen sowie die naturwissenschaftlich-technischen Aspekte der Entsorgung. Fast alle Interviewten aus beiden Gruppen plädieren für ein wissenschaftsbasiertes, vergleichendes Standortauswahlverfahren und eine Entsorgung aller Arten hoch radioaktiver Abfälle innerhalb Deutschlands, da der Export der nuklearen Reststoffe hohe Unsicherheiten in sich birgt und das Verursacherprinzip unterminiere. Insbesondere für die BI-Vertreterinnen und -Vertreter stellt der Ausstieg aus der kommerziellen Kernenergienutzung die Grundbedingung einer neuen Standortsuche dar. Hier sind vor allem die BI-Vertreterinnen und -Vertreter aus bereits von Anlagen zur Entsorgung betroffenen Regionen der Auffassung, dass der Salzstock Gorleben von der neuen Suche hätte ausgeschlossen werden müssen. Aufgrund des vielfach entstandenen Misstrauens, das in der bisherigen Entsorgungspolitik wurzelt, besteht häufig die Sorge, dass die politisch motivierte Auswahl Gorlebens mithilfe des neuen Verfahrens gleichsam rückwirkend legitimiert werden soll. Die Befragten aus den AKW-Gemeinden und aus den potenziell betroffenen Regionen erachten es demgegenüber tendenziell als legitim und konsequent, dass sich auch Gorleben den neuen Kriterien eines neuen Standortauswahlverfahrens stellen müsse.

In Anbetracht derartiger Kontroversen hätte das vom StandAG gesetzlich geregelte Standortauswahlverfahren nach Auffassung mehrerer Kommunalpolitikerinnen und -politiker sowie BI-Vertreterinnen und -Vertretern aus fast allen Regionen erst beginnen sollen, wenn mit der Entsorgung verbundene grundsätzliche Konflikte und offene Fragen – z. B. zu möglichen Alternativen der untertägigen Entsorgung – im gesell-

schaftlichen Dialog geklärt und bestenfalls befriedet worden wären (vgl. (Drögemüller, 2016, S. 199f)). Vielfach sind die Befragten der Meinung, dass ein breiter Dialog bzw. Diskussionsprozess hilfreich wäre, um „die“ Gesellschaft auf den bevorstehenden Suchprozess vorzubereiten. Auf diesem Wege hätten weitere Teile der Öffentlichkeit – und vor allem die zukünftig Betroffenen – frühzeitig eingebunden werden können, mit dem Ziel, vor der Standortsuche (im Idealfall) einen gesamtgesellschaftlichen Konsens zu erzielen, der als Grundlage eines breit getragenen Verfahrens gedient hätte.

Insgesamt werden vor allem in Bezug auf die regionale Beteiligung von potenziell Betroffenen (Bevölkerung, Kommunalpolitik, NGOs) hohe Ansprüche formuliert. Dabei werden vor allem mit Blick auf antizipierte Verfahrensgerechtigkeit verschiedene Aspekte für sinnvoll erachtet, die einen Dialog oder eine Kooperation auf Augenhöhe (vgl. (Drögemüller u. Kuppler, 2017, S. 123)) zwischen Behörden und Betroffenen auf unterschiedlichen Ebenen forcieren. Über alle Interviews hinweg wurde es bspw. als äußerst wichtig erachtet, die potenziell Betroffenen frühzeitig und problemorientiert vor Ort zu informieren und einzubeziehen. Insbesondere vor dem Hintergrund früherer Erfahrungen waren viele Befragte der Ansicht, dass sich die Beteiligung dabei jedoch nicht in Informations- und Konsultationsmodi erschöpfen, sondern den regional Betroffenen effektive Formen der Mitsprache ermöglichen sollte, die über bisherige Beteiligungsmöglichkeiten hinausgehen. Für viele Personen setzt dies eine Institutionalisierung und eine klare Definition von Beteiligungs- und Mitspracherechten sowie die Regelung von Unterstützungsmaßnahmen für betroffene Bürgerinnen und Bürger voraus (z. B. finanzielle Transferleistungen zur Expertenakquise). Allerdings weisen auch einige Kommunalpolitiker darauf hin, dass gesetzlich geregelte Verantwortlich- und Zuständigkeiten nicht ausgehebelt bzw. durch Bürgerbeteiligung ersetzt werden könnten⁵¹.

Die Effektivität von Bürgerbeteiligung bemisst sich für viele Personen zudem daran, inwiefern sich die mittels Beteiligungsverfahren erarbeiteten Ergebnisse für den weiteren Prozess als relevant erweisen bzw. für die zuständigen Behörden eine bindende Wirkung entfalten. Nachvollziehbare Entscheidungswege und Informationen sowie eine wertschätzende Kommunikation gelten neben transparenten, d. h. eindeutig definierten Verfahrensstrukturen und Rollenzuschreibungen ebenfalls als wichtige Elemente eines als fair bzw. legitim beurteilten Beteiligungsverfahrens (vgl. (Drögemüller, 2016, S. 201)).

⁵¹Siehe dazu auch (Mbah, 2017, S. 10ff).

Im Zuge der Reflexion von Aspekten zur Förderung prozeduraler Gerechtigkeit werden nahezu übereinstimmend auch Ausgleichs- und Fördermaßnahmen für betroffene Standorte als angemessen erachtet, um bspw. materielle oder immaterielle Schäden (z. B. sinkende Immobilienpreise, Stigmatisierung) zu kompensieren. Allerdings gelten Kompensationen als illegitim oder anrühig („Schmiergeld“), wenn diese an Bedingungen geknüpft werden – insbesondere, wenn diese auf die Akzeptanz der kommunalen Gebietskörperschaften abzielen oder lediglich für lokale Prestigeprojekte verwendet werden (z. B. Bau von Schwimmbädern). Mit Blick auf die Standortentscheidung fordern einige befragte BI-Vertreterinnen und -Vertreter, die zukünftig betroffenen Kommunen mit Vetorechten auszustatten, um diese u. a. dazu in die Lage zu versetzen, sich gegen Mehrheitsbeschlüsse wehren zu können. Andere Kommunalpolitikerinnen und -politiker sowie BI-Vertreterinnen und -Vertreter lehnen die Implementation von Vetorechten jedoch mit dem Verweis auf die Entscheidungsbefugnis demokratisch legitimierter Gremien bzw. der drohenden Dominanz partikularer Interessen ab⁵².

Diese Befragten hielten eine Standortentscheidung durch den Bundestag durchaus für legitim, sofern die Betroffenen im vorherigen Standortauswahlverfahren in der Tat von „echten“ Mitwirkungs-, Mitentscheidungs- und Klagerechten Gebrauch machen können (Drögemüller, 2016, S. 207).

Mit Blick auf die Bewertung unterschiedlicher Entsorgungsoptionen hat sich gezeigt, dass insgesamt keine Entsorgungsoption eindeutig präferiert wird, da mit allen Optionen jeweils Vor- und Nachteile sowie Unwägbarkeiten und Unsicherheiten assoziiert werden. Zwar wird die tiefengeologische Entsorgung als dauerhafte Form der Entsorgung mehrheitlich favorisiert, jedoch bestehen ambivalente Auffassungen darüber, über welchen Zeitraum eine etwaige Rückholung der Abfälle möglich sein sollte: Ein Teil der Befragten plädiert für die Implementation von Vorkehrungen, die eine dauerhafte Rückhol- bzw. Bergbarkeit ermöglichen; ein anderer Teil hält einen zügigen Verschluss nach der Einlagerung der Abfallgebinde für erstrebenswert. Als dauerhafte Entsorgungsoption wird die Oberflächenlagerung abgelehnt. Dies geschieht vor allem aufgrund der im Vergleich zur Tiefenlagerung als unbefriedigend wahrgenommenen Sicherungs- und Einschlussmöglichkeiten durch fast alle Befragten. Eine längerfristige Lagerung an der Erdoberfläche wird allenfalls als notwendige Interimslösung für sinnvoll erachtet.

Zusammenfassend unterstreichen die empirischen Ergebnisse den Bedarf einer verlässlichen und gleichermaßen robusten Endlager-Go-

⁵²Zu den Vetorechten siehe z. B. Decker (2014); Linden (2016).

vernance. Demgegenüber werden gesellschaftliche Widerstände durch einen Mangel an Partizipation geradezu unterstützt und darauf aufbauend Paralyse der Problembearbeitung befördert. Die meisten Befragten erwarten neue Formen des Regierens, die eine breite und qualitativ hochwertige Bürgerbeteiligung mit fairen Verhandlungsprozessen zwischen Entscheidungsträgern und Betroffenen forcieren und sich mit Erkenntnissen der Governance- und Partizipationsforschung in Einklang bringen lassen. Die Öffentlichkeitsbeteiligung sollte spezifischen Informations- und Beteiligungsbedürfnissen unterschiedlicher Akteure gerecht werden und insbesondere den lokal Betroffenen verbindliche und effektive Formen der Einflussnahme bieten, die über bisherige Formen institutionalisierter Beteiligungsformen (z. B. Anhörung, Erörterung) hinausgehen. Neutrale Prozessbegleiter (z. B. Mediatorinnen und Mediatoren, verfahrensexterne Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler) könnten vor Ort eine Konfrontation von Vorhabenträger und Betroffenen kanalisieren, Konflikte aufnehmen und faire Aushandlungsprozesse zusätzlich befördern. Da sich gezeigt hat, dass die Beurteilung der gegenwärtigen Politik oft von hohem Misstrauen geprägt ist, das in alten Konflikten und Wertverletzungen wurzelt, erscheint eine historische Aufarbeitung des Entsorgungskonflikts erforderlich.

Merkmale für die Gestaltung professioneller Governance-Prozesse

Aus der Governance-Forschung des ITAS, des FFU und des IRW können einige wichtige Merkmale für die zukünftige Gestaltung professioneller Governance-Prozesse abgeleitet werden. Als Anknüpfungspunkt werden hier die Gesichtspunkte „Fairness“ und „Transparenz“ eingeführt, die in der Partizipationsforschung prominent platziert werden⁵³.

Bei der Gestaltung von Entscheidungsprozessen nehmen beide Begriffe und die hinter ihnen liegenden Konzepte dann besonderen Raum ein, wenn über die Qualität und die Gestaltung professioneller Governance-Prozesse reflektiert wird. Die Qualität von Verfahren, so ein Ergebnis von Mbah (2017) hängt in besonderer Weise von der Operationalisierung dieser beiden Momente ab. Mit Fairness⁵⁴ ist vor dem Hintergrund eines repräsentativen Demokratiemodells zunächst gemeint, dass die Gleichheit aller nicht verletzt werden darf, um Repräsentativität und damit Legitimität zu gewährleisten (Mbah, 2017, S. 22ff). Folglich besteht die Notwen-

⁵³Zum Forschungsstand der Partizipationsforschung siehe Mbah (2017).

⁵⁴Nach (Visschers u. Siegrist, 2012, S. 293) ist darunter der Grad zu verstehen, zu dem eine Person sich gerecht behandelt fühlt bzw. zu dem mit einem Sachverhalt akzeptabel verfahren wird.

digkeit, alle konkret vorgetragenen Argumente und die damit immer auch verknüpften Interessen im Entscheidungsprozess ausreichend zu berücksichtigen. Aufgrund veränderter gesellschaftlicher Voraussetzungen können politische Entscheidungen nicht mehr allein den gesetzlich gewählten Repräsentantinnen und Repräsentanten und der Wissenschaft⁵⁵ überlassen werden, sondern es sind umfassende Mitspracherechte für gesellschaftliche Individuen zu gewähren, um dem Wunsch nach partnerschaftlicher politischer Entscheidungsfindung zwischen Entscheidungsträgern und Betroffenen zu entsprechen. Hiermit sind folglich Beteiligungsprozesse auf Augenhöhe gemeint, die allen Beteiligten die Chance bieten, ihren Argumenten Gehör zu verschaffen. Dies sollte unter den Voraussetzungen eines wechselseitig wertschätzenden und respektvollen Umgangs geschehen. Entsprechend faire Aushandlungsprozesse können durch neutrale Prozessbegleiter wie beispielsweise Mediatorinnen und Mediatoren befördert werden (Drögemüller, 2018).

Vor dem Hintergrund der langen Zeiträume, die im Kontext der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle betrachtet werden müssen, schließt Fairness auch die Beachtung von Generationengerechtigkeit (siehe Kapitel 3.8) ein. Letzteres betont die Bedeutung von partizipativen Verfahren, die die Beteiligung aller Interessen einschließt und in denen alle Beteiligten die Möglichkeit des Gehörtwerdens haben. Gehörtwerden zukünftiger Generationen ist zwar nicht direkt möglich, weist als Forderung aber darauf hin, dass die Verantwortung gegenüber zukünftigen Generationen in besonderer Weise bedacht und beraten werden muss. D. h. heutige Generationen müssen die Belange zukünftiger Generationen reflektieren und sich diesen gegenüber verhalten (vgl. Hocke (2015b)). Voraussetzung hierfür sind auch unter diesem Gesichtspunkt die frühzeitige und problemorientierte Information und Einbindung der Betroffenen vor Ort und die Absicherung durch institutionelle Vorkehrung wie sie z. B. im erweiterten Long-term-Stewardship-Konzept vorgeschlagen werden (Di Nucci u. a., 2017; Drögemüller, 2018; Kuppler u. Hocke, 2015). Um eine effektive Mitsprache zu ermöglichen, müssten Ergebnisse aus partizipativen Verfahrenselementen in die Entscheidungsfindung einfließen – sowohl in die aktuelle wie die der nahen Zukunft⁵⁶. Dies schließt ein, dass Beteiligungsverfahren in der politischen Entscheidungsfindung in-

⁵⁵Wissenschaft wird hier im Sinn zuständiger Experten (akademisch und anwendungsorientiert) sowie den beobachtenden Instanzen wissenschaftlicher Verfasstheit verstanden (Expertengruppen, Reviews und disziplinärer Debatte) (zur nicht unproblematischen Arbeitsteilung in wissenschaftliche Strukturen siehe Weingart (2003); Böschen (2016).

⁵⁶Der Ergebnisstand der fachlichen Debatte zu Partizipation wird vielmehr hier zu Ende gedacht. Wie diese Erwartungen der Partizipationsforschung integriert werden können, ist im Kontext hier nicht zu leisten.

stitutionalisiert werden. Damit wird nicht nur deren Legitimität im repräsentativen Demokratiemodell gefestigt, sondern auch gewährleistet, dass wiederholt Entscheidungen auf der Basis umfassender Beteiligungsarrangements getroffen werden können, indem auf etablierte Verfahren und für die Durchführung notwendige organisatorische Strukturen zurückgegriffen werden kann (Kuppler u. Hocke, 2018).

An dieser Stelle muss das Kriterium der Transparenz erläutert werden, da diesem für die Qualität von Beteiligungs- und Entscheidungsprozessen eine hohe Bedeutung zukommt, wie auch das Beispiel der Transparenzkultur in der Schweiz verdeutlicht (Kuppler, 2017). Es geht hierbei nicht nur um die Anerkennung der Wichtigkeit von Transparenz, sondern auch um die Frage, welche Art von Transparenz zu welchem Anlass erforderlich ist (Kuppler, 2016). Transparenz meint zunächst, dass die einzelnen Verfahrensschritte einer politischen Entscheidung nachvollziehbar sein müssen. Darunter ist aber auch zu verstehen, dass das den Entscheidungen zugrundeliegende Wissen und die damit einhergehenden Ungewissheiten offen dargelegt und der interessierten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Das schließt ein, dass Informationsmaterialien und wissenschaftliche Erkenntnisse so aufbereitet werden, dass diese auch für außerwissenschaftliche Akteure, externe Beteiligte und Betroffene verständlich sind. Bereits in der Suche nach geeigneten Endlageroptionen wie auch in der Beratung über die Auswahl aus den Optionen spielt Wissen – relativ zu den Kriterien, die ein Endlager erfüllen soll – eine zentrale Rolle. Ob z. B. eine Endlagerung in einer tiefen geologischen Formation angestrebt wird oder ob man sich für eine langfristige Oberflächenlagerung entscheidet, hängt sowohl vom verfügbaren Wissen als auch von Einschätzungen darüber ab, welches Wissen möglicherweise in Zukunft verfügbar sein könnte (Grunwald, 2016, S. 111). Die Debatten um inter- und transdisziplinäre Forschung weisen übereinstimmend darauf hin, dass der außerwissenschaftliche Problemdruck und die Erwartung, dass Wissenschaft zentrale Beiträge zur Lösung gesellschaftlicher Probleme leisten kann und soll, wesentliche Motivationen für Wissensintegration⁵⁷ sind: Es geht letztlich um die Bereitstellung von Orientierungen und Handlungswissen (Grunwald, 2016, S. 112).

Ein transparentes Verfahren schließt zudem ein, dass die Verfahrensstrukturen eindeutig definiert und Verantwortlichkeiten festgelegt sind. Werden die genannten Merkmale ausreichend in zukünftigen Entscheidungsprozessen berücksichtigt, so erhöht sich die Qualität von

⁵⁷ Wissensintegration ist eine der zentralen Herausforderungen von „Wissensgesellschaften“, wie sie von Stehr und anderen beschrieben wird (vgl. Stehr (2003); Wissenschaftsrat (2015)).

Beteiligungs- und Entscheidungsverfahren gleichermaßen. Einer Institutionalisierung wird unter anderem auch deswegen eine hohe Bedeutung beigemessen, da nur so sichergestellt werden kann, dass Wissensbestände an zukünftige Generationen übergeben werden können. Es darf nicht nur in der Gegenwart gedacht werden, sondern mittlere und entferntere Zukünfte müssen als Herausforderung begriffen werden, für die entsprechende Strukturen und Mechanismen entwickelt und etabliert werden müssen. Diese haben Anpassungen an veränderte Rahmenbedingungen ebenso zu ermöglichen wie Konfliktmanagement effektiv betreiben und so robuste Entscheidungen hervorbringen können (Kuppler u. Hocke, 2018).

Transparente Verfahrensstrukturen und Entscheidungsprozesse sind darüber hinaus auch in Hinblick auf vielfach entstandenes Misstrauen gegenüber Expertinnen und Experten, Institutionen und Entscheidungsprozessen bedeutsam. Ohne ein Vertrauen schaffendes Verfahren zur Standortwahl, Entwicklung und Betrieb einer risikobehafteten Anlage ist kurzfristig mit einer Entschärfung des Konflikts kaum zu rechnen. Dagegen sind weniger Konflikte zu erwarten, wenn die zuständigen Behörden oder die durchführenden Organisationen als kompetent, unvoreingenommen und ausreichend auf die Bedenken der Öffentlichkeit eingehend wahrgenommen werden (Di Nucci, 2016, S. 137).

Eine Akteursgruppe und damit auch ein gesellschaftliches Teilsystem stehen in besonderer Verantwortung und werden durch Ansprüche wie Gerechtigkeit, Fairness und Transparenz besonders herausgefordert. Dies sind die „Regierungsorganisationen“. Zu ihnen gehören sowohl Parlamente (national, regional und lokal sowie international), aber auch Teile der Exekutive sowie halbstaatliche Unternehmen. Diese Teile der Exekutive sind Behörden (wie das Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit) oder Fachministerien in Deutschland (insbesondere auf Landes- und Bundesebene); letztere sind immer auch mit parteipolitischen Positionen verknüpft, wodurch Herausforderungen für die Kooperation und Koordination entstehen. Diese Begriffe sind aus der Governance-Forschung übernommen. Sie sind nicht nur analytisch ertragreich, sondern verweisen auch auf die mehrfach komplexe Ewigkeitsaufgabe, die in besonderer Weise von Kooperation und zielführender Koordination bestimmt sein sollte. Mit Ausdauer müssen in einer mehrfach komplexen Umwelt spätmoderner Gesellschaften Diskurs und Fachpolitik koordiniert und mit guten Argumenten beeinflusst werden. Gleichzeitig ist Kooperation sicherzustellen. Sicherzustellen bedeutet, eine Vielzahl von Akteuren aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft (inkl. Protestgruppen) an einen Tisch zu holen. Andererseits sind anspruchsvolle Beteili-

gungs- und Kooperationsprozesse von den verantwortlichen staatlichen Akteuren anzustoßen, über Jahrzehnte zu organisieren und qualitativ gut abzuschließen. Gut meint hier im Sinne von Good Governance, dass alle Akteure mit ihren Argumenten und Wissensbeständen mindestens umfassend „gehört“ werden. Nach aktuellem Stand der sozialwissenschaftlichen Governance / Partizipations-Debatte sollten sie auch die Entscheidungsprozesse mitgestalten können.

3.7.4 Regulierung und Governance

Der Begriff Regulierung wird in der Rechtswissenschaft staatsbezogen akzentuiert. Regulierung wird als „jede gewollte staatliche Beeinflussung gesellschaftlicher Prozesse (...), die einen spezifischen, aber über den Einzelfall hinausgehenden Ordnungszweck verfolgt und dabei im Recht zentrales Medium und Grenze findet“, verstanden (Eifert, 2012, Rz. 5f). Damit wird „die Wirkung staatlichen Handelns als Teilproblem seiner Programmierung“ betont (Eifert, 2012, Rz. 7); mit anderen Worten, wenn sich die Art der Entscheidungsfindung verändert, beispielsweise von staatlicher Top-down-Gesetzgebung hin zu Verhandlungsprozessen zwischen verschiedenen Akteuren, dann ist das als die Folge der veränderten staatlich gewollten Steuerung und damit als Regulierung zu sehen. Aus sozial- und politikwissenschaftlicher Sicht ist regulierendes Handeln im Rahmen der Gewaltenteilung als mehrstufiges und überprüfbares Handeln einzustufen, das durch seine Muster der Interessenaggregation Argumente integriert, die Gesetzgebungsverfahren prüft und dann als kollektiver Wille und Ordnungsgedanke verbindlich wird.

Bis 2013 war für die rechtliche Zulassung eines Endlagers für radioaktive Reststoffe in der knappen Regelung des Atomgesetzes das Planfeststellungsverfahren vorgesehen. Seit langem ist das Planfeststellungsverfahren das eingeführte Format für die Zulassung großer Infrastrukturvorhaben gewesen. Es fasst Öffentlichkeitsbeteiligung und Entscheidungsfindung in einem einzigen Verfahren zusammen, das alle notwendigen rechtlichen Zulassungen integriert (z. B. nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz, Bundesberggesetz oder dem Baugesetzbuch).

Insbesondere an dem Bahnprojekt Stuttgart 21 und den dagegen gerichteten Widerständen wurde deutlich, dass dieses Regelungsformat den gesellschaftlichen Bedürfnissen nicht mehr entspricht und nicht mehr hinreichend befriedend und legitimitätsstiftend wirkt. Die Gesellschaft ist nicht mehr bereit, die formal-rechtlich korrekt ergangenen Entscheidungen einfach hinzunehmen (Spieker u. Bachl, 2013). Diese Vorkommnisse lösten in der Rechtswissenschaft Reformvorschläge aus,

die wie etwa die Frühe Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 25 Abs. 3 Verwaltungsverfahrensgesetz in die Rechtsordnung übernommen wurden (Ziekow, 2013).

Damit setzt sich eine Tendenz fort, die das (Umwelt-)Recht in den letzten Jahrzehnten immer wieder zur Erweiterung seines Handlungsreper-toires gezwungen hat. Wenn sich auf herkömmliche Weise die Ziele der Regulierung nicht mehr erreichen lassen, so müssen neue Herangehensweisen ergänzend zur Verfügung gestellt werden (Ritter, 1992). Mit den veränderten gesellschaftlichen Haltungen und Ansprüchen korrespondieren die Governance-Konzepte, wie sie vor allem in der Politikwissenschaft diskutiert und fortgeschrieben wurden (vgl. Kapitel 3.7.1).

Das Standortauswahlgesetz als Regulierung für die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle, die demonstrativ einen Neustart des bisherigen staatlichen Herangehens belegen soll, macht zahlreiche Anleihen bei Governance-Konzepten und partizipationswissenschaftlich vorgeschlagenen Formen der Verständigung. Insofern stellt das StandAG, mit der elaborierten neuartigen Anlage des Regelungsdesigns für das Standortauswahlverfahren, gegenüber der bisherigen Orientierung am Ordnungsrecht aus rechtswissenschaftlicher Sicht einen Paradigmenwechsel dar.

Zu unterscheiden sind allerdings die unterschiedlichen Phasen der Entstehung und Weiterentwicklung des StandAG. Während sich das erste Gesetzgebungsverfahren zum StandAG 2013 lediglich durch die Online-Verfügbarkeit immer neuer Referenten-Entwürfe in der Herangehensweise von anderen Gesetzgebungsverfahren abhob (Smeddinck u. Roßegger, 2013, S. 553), gewann im Weiteren die durch das StandAG 2013 eingesetzte Endlager-Kommission großen Einfluss auf die Fortentwicklung des Gesetzes. Befürchtungen der Gesellschaft, das StandAG 2013 sei – gleichsam aufoktroiert – das letzte Wort des Gesetzgebers, bestätigten sich also nicht. Zum einen hatte das BMUB außer der Reihe schon im Mai 2013 in der Spätphase der Gesetzgebung zum StandAG eine Veranstaltung zur Diskussion des Gesetzentwurfes eingeschoben, der auch tatsächlich noch zu Änderungen am Gesetzestext führte (Smeddinck u. Roßegger, 2013, S. 553). Zum anderen war das StandAG bereits 2013 auf Fortentwicklung angelegt, namentlich durch die Evaluierungspflicht für die Endlager-Kommission, die dann auch zu mehreren Novellierungen und umfangreichen Änderungen insgesamt führte (Smeddinck, 2017a, S. 195ff).

Dass ein Gesetz und seine Wirksamkeit Teil und Folge eines gesellschaftlichen Kontextes sind, verdeutlichte die Weigerung der meisten Umweltverbände, sich an der Endlagerkommission zu beteiligen. Einerseits wurden die Einflussmöglichkeiten als zu gering eingeschätzt (vgl.

(Krick, 2013, S. 248)). Festgemacht wurde dies am Regelungszuschnitt der Endlager-Kommission und an den gewachsenen gesellschaftlichen Erwartungen auf Beteiligung. Andererseits – und wohl schwerer wiegend – wirkten die Erfahrungen aus den konfliktträchtigen Auseinandersetzungen um die friedliche Nutzung der Kernenergie in Deutschland nach (Smeddinck, 2016). Verlorenes Vertrauen in zentrale staatliche Akteure dürfte dabei eine eminente Rolle gespielt haben.

Generell ist festzustellen, dass der Übergangsbereich zwischen Politikberatung, Partizipation und Regulierung größer wird ((Ismayr, 2012, S. 24ff); vgl. auch (Eifert, 2012, Rz. 35 u. 52)). Fachleute wie Betroffene werden immer häufiger und auf sehr unterschiedliche Art und Weise in Entscheidungsprozesse und rechtlichen Vollzug integriert. Das Spektrum reicht von Einspeisung der fachlichen Expertise bis zur Formulierung eigener Interessen. Die Übergänge werden fließend: Kompetente Laien werden zu Beraterinnen und Beratern und Mit-Entscheidern ((Schuppert, 2012, S. 62); Sutter (2005)). Gleichzeitig lagert die Politik Erörterungen und Entscheidungen an externe Gremien aus und lässt sich durch deren Votum mehr oder minder stark binden. In dieses Feld neuer Arrangements gehört auch die oben genannte Endlagerkommission (nach § 3 StandAG 2013), zu deren Aufgabe es zählte, Empfehlungen an den Bundestag zu richten (Smeddinck u. Willmann, 2014, S. 104).

Die unausgesprochene Umstellung von Ordnungsrecht zu Governance als Leitbild der Gesetzgebung im StandAG, die sich hinter der Chiffre des „Neustarts“ verbirgt, führt nicht und kann aus verfassungsrechtlichen Gründen auch nicht dazu führen, dass das bisherige Rechtssystem und das rechtliche Zulassungsverfahren verdrängt oder ersetzt werden. Die Rolle staatlicher Regulierung in der politischen Steuerung verändert sich, verliert aber nicht an Bedeutung (Jacob u. a., 2007, S. 25). Neue Formen der Öffentlichkeitsbeteiligung werden also eröffnet und treten letztlich additiv zu traditionellen rechtlichen Bewirkungsmechanismen hinzu. Die Folgen dieser Entwicklung sind ambivalent einzuschätzen. Einerseits kommt die staatliche Seite Wünschen und Forderungen aus der Gesellschaft entgegen. Andererseits wirken diese neuen Foren der Verständigung verunsichernd auf etablierte Akteure und erregen Misstrauen, da es damit wenig praktische Erfahrungen gibt (Peters (2015b); (Smeddinck, 2017a, S. 205))⁵⁸.

Eine starke Orientierungswirkung hat der Abschlussbericht der Endlagerkommission entfaltet und ist tatsächlich als Legitimationsgrundlage für die Novellierung des StandAG leitend geworden. Den Empfehlungen

⁵⁸In welchem Umfang sich die neuen Formen der Öffentlichkeitsbeteiligung in Deutschland bereits etabliert haben, ist nach Forschungslage nicht abschließend zu beantworten.

der Kommission kam keinerlei gesetzlich angeordnete Bindungswirkung für die nachherige Gesetzesentscheidung des Bundestages zu. Gleichwohl hat sich die prognostizierte hohe faktische Bindungswirkung bestätigt (vgl. (Smeddinck u. Willmann, 2014, S. 110); Smeddinck (2017a)).

Um die rechtliche Komplexität des Standortauswahlverfahrens im Zaum zu halten, hat der Gesetzgeber sich entschieden, im Wesentlichen Entscheidungen im Wege der Legalplanung zu sanktionieren. Das heißt, grundsätzlich planfeststellungsbedürftige Vorhaben werden durch Parlamentsgesetz zugelassen. Das bedeutet eine Zentralisierung des Verfahrens und eine Einschränkung für föderale und gerichtliche Einwirkungsmöglichkeiten. Zugleich sind Klagemöglichkeiten für Gemeinden und Nachbarn entsprechend dem Umweltrechtsbehelfsgesetz eröffnet worden, die es bisher so nicht gab.

Gleichwohl wird die Legalplanung von Bürgerinnen und Bürgern als Entmündigung und staatliche Ermächtigung wahrgenommen. Die neuen Formen der Öffentlichkeitsbeteiligung werden hingegen weniger als zeitgemäße ergänzende Form der Entscheidungsfindung – gegenüber der Gerichtsentscheidung, die typischerweise eine Seite obsiegen und die andere verlieren lässt und damit Konflikte nicht nachhaltig löst – und auf Konsens zielende Kompensation wahrgenommen (Smeddinck u. Semper, 2016, S. 245f), obwohl sie auch von der Forschung als wichtiges Instrument bürgerschaftlichen Engagements und fortschreitender Demokratisierung empfohlen werden (Röthel, 2011).

Unweigerlich wird für die Beurteilung und Einordnung des regulatorischen Designs die Frage nach den Maßstäben aktualisiert. Der Staat muss nicht sozialwissenschaftlichen Konzeptionen oder gesellschaftlichen Stimmungen folgen, sondern darf und muss sich an das Verfassungsrecht halten. Das Bundesverfassungsgericht (1997) hat die Legalplanung unter bestimmten Bedingungen zugelassen⁵⁹.

Im StandAG sind darüber hinausgehend sogar mehrere aufeinander aufbauende gesetzliche Entscheidungen vorgesehen. In den Verfassungsrechtslehrbüchern gilt das Parlamentsgesetz als die demokratischste aller Entscheidungen im staatlich-politischen System der Bundesrepublik Deutschland (Brenner, 2005, Rz. 70). Hiermit wird dem Anspruch der Gleichheit in Form der Repräsentativität der Volksvertreter gefolgt und damit die Legitimität von parlamentarischen Entscheidungen erzeugt. Im Übrigen fürchten manche, dass eine größere Beteiligung nicht legitimierter Gruppierungen sogar zu weniger demokratischen Entscheidungen führen würde ((Hien, 2012, S. 132), (Böhm, 2011, S. 618), vgl. auch Schink (2011)). Umgekehrt skizzieren und fordern Governance-Konzepte Betei-

⁵⁹Beschluss vom 17.07.1996, 2 BvF 2/93, NJW 1997, S. 383ff

lungsmöglichkeiten bis hin zur Mit-Entscheidung von Bürgerinnen und Bürgern (Arnstein, 1969; Di Nucci u. a., 2017) und in der Rechtswissenschaft sehen manche die Möglichkeit, die vielfach anzutreffende Differenz zwischen gesellschaftlicher Vorstellung und institutionell legitimierten Gesetzen durch neue Formen der Bürgerbeteiligung zu überbrücken, gerade aus verfassungsrechtlicher und verfassungspolitischer Sicht (Schön, 2013, S. 21 u. 32).

Trotz der immer wieder neuen Berechtigung künftiger Parlamente, von dem vorgezeichneten Pfad des Standortauswahlverfahrens und den im StandAG vorgegebenen Stufen abzuweichen (Smeddinck, 2017b), wird zunächst auf die Überzeugungskraft des eingeschlagenen Weges und des gewählten Legitimationskonzeptes aus aufeinander aufbauenden gesetzlichen Entscheidungen vertraut (König, 2012, S. 237). Insofern mag es nicht überraschen, dass in konservativeren Kreisen der Rechtswissenschaft der Zuschnitt des StandAG mit seinen innovativen Öffentlichkeitsbeteiligungsformaten als systemwidrig abgelehnt wird (Bull, 2014; Wiegand, 2014; Gärditz, 2015). Vertreterinnen und Vertreter unterschiedlicher Disziplinen, die sich wissenschaftlich mit Partizipation auseinandersetzen⁶⁰, präferieren die Möglichkeit, Formate der Konfliktlösung flexibel auswählen zu können. Gegenüber dem StandAG 2013 wurde wohl auch deshalb die Öffentlichkeitsbeteiligung rechtsverbindlich durchreguliert und die gleichwohl fortschrittlichen Regelungen, die jetzt auch Nachprüfungsrechte und einen Partizipationsbeauftragten umfassen, wieder um traditionelle sowie scharf kritisierte Formate wie den Erörterungstermin ergänzt (Smeddinck, 2017a). Es lassen sich rechtswissenschaftliche Überlegungen wie gesetzgeberische Entscheidungen beobachten, die von Governance-Konzeptionen inspiriert sind. Dazu zählt die Gestaltung des StandAG 2013 wie 2017. Nicht zuletzt durch die Möglichkeit weiterer Evaluierungen bleibt das StandAG ein lernendes Gesetz und kann unter dem Eindruck neuer Erkenntnisse und Bedürfnisse weiterentwickelt werden (Smeddinck, 2017a). Die Suche nach neuen Formen der Verständigung führt auch in anderen Feldern der Energiewende zu tiefergehenden, auch disziplinübergreifenden Analysen (Roßnagel u. a., 2014), und veränderten Infrastrukturzulassungen wie etwa beim Netzausbaubeschleunigungsgesetz (Peters, 2015a).

Unabhängig davon ist der Governance-Begriff in der Rechtswissenschaft ohne Begeisterung und größere Verbreitung aufgenommen worden (wohlwollend bspw. Schuppert (2007)). Einerseits ist auf die parti-

⁶⁰Unter anderem sind hier Politikwissenschaften und Rechtswissenschaften gemeint, siehe dazu (Stender-Vorwachs, 2015, S. 155), (Dolde, 2013, S. 771), und (Smeddinck, 2017b, Rz. 33).

ell auftretende Regulierungsschwäche des Staats und das Fehlen eines souveränen Zentrums hingewiesen worden (Franzius, 2005). Andererseits ist die konzeptionelle Blaupause für den Staat, der sich zurückzieht und nicht alle Steuerungsaufgaben gleichmäßig wahrnehmen kann und stärker gesellschaftliche Akteure einbezieht, unter dem Stichwort des Gewährleistungsstaates thematisiert worden (Schuppert, 2005). Anstelle des Governance-Begriffs ist für die intradisziplinäre rechtswissenschaftliche Auseinandersetzung der Begriff der Regelungsstrukturen vorgeschlagen worden. Damit wird das Regulierungsinteresse auf die Effekte und Zusammenhänge zwischen Handlungsmaßstäben, Institutionen und Instrumenten gelenkt (Trute u. a., 2004). Der Staat akzentuiert also die Förderung der Interaktion in und zwischen Netzwerken. Mit dem Hinweis auf die Kernfunktionen von Recht, mit der Zuweisung konkreter Handlungsmöglichkeiten und Pflichten wird der Governance-Begriff als nicht passfähig zu den herkömmlichen rechtlichen Grundkategorien abgelehnt (Voßkuhle, 2012, Rz. 70).

3.7.5 Long-term Governance als wichtige institutionelle Herausforderung

Die hier beschriebenen Ergebnisse basieren auf einer interdisziplinären Vorstudie, die sich aus der politischen Öffnung für die Option eines Tiefenlagers mit Rückholbarkeit problemorientiert ergab. Zum Thema Long-term Governance wurde ein internationaler Workshop durchgeführt, bei dem auch das Thema technisches Monitoring vertieft reflektiert wurde (s. Kap. 3.6). Die Ergebnisse sind als explorativ einzustufen. Ein editierter Sammelband befindet sich im Erscheinen, ebenso liegt ein Beitrag in einer internationalen Fachzeitschrift mit Peer-Review vor (Hocke u. a., 2018; Kuppler u. Hocke, 2018).

Die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle beansprucht extrem lange Zeithorizonte. Sie reichen über die Betriebsphase hinaus, in der die radioaktiven Abfälle transportiert, umverpackt und eingelagert werden. Prinzipiell sind nach deren Ende unterschiedliche Optionen möglich. Es könnte entschieden werden, dass bei einem Tiefenlager mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit die Monitoring-Phase während der Betriebsphase beginnt und vor dem endgültigen Verschluss eine zweite Monitoringphase angehängt wird (siehe Kapitel 3.2.5 und die Arbeiten zu VP5). Es könnte aber auch den Empfehlungen der Endlagerkommission gefolgt werden, dass das Endlager nach Ende des Einlagerungsbetriebs bis zum endgültigen Verschluss überwacht werden soll. Unabhängig davon, wie diese Entscheidungen letztendlich gefällt werden, ist heute absehbar, dass der

Verschluss nah an das Ende dieses Jahrhundert heranrücken kann, wenn er nicht sogar deutlich ins nächste Jahrhundert hineinreicht. Nach dem Vorsorgeprinzip ist es daher angebracht, alle Planungen nicht an einer zu kurzen Zeitspanne abzubilden.

Selbst über eine Zeitspanne von sieben oder acht Jahrzehnten ist der Entsorgungsprozess nicht in all seinen möglichen sozialen und institutionellen Veränderungen bezüglich vorhandener Planungsinstrumente, Ansprüchen an Sicherheit, Vergabe von Verantwortlichkeiten und Entscheidungsstrukturen absehbar. Käme es aber zu einem Abbruch der Kontrolle des Endlagerbergwerks in den Phasen vor Verschluss, müsste mit einem erhöhten Risiko der Schädigung von Mensch und Umwelt gerechnet werden (vgl. Czada (2016)). Daher werden öffentliche Institutionen benötigt, die die Fähigkeit besitzen, notwendige Verwaltungsprozesse zu überblicken und zu organisieren sowie Entscheidungen zu treffen. Diese müssten gezielt auch die regional betroffene sowie die interessierte (nationale) Öffentlichkeit einbinden. Anlässe, bei denen diese Institutionen in jedem Fall Übersicht, Kompetenz und Handlungsfähigkeit beweisen müssten, wären eindeutig negative Entwicklungen des Endlagersystems oder der Verdacht auf solche. Ein anderer Typus wären Fälle, in denen die Sicherheit der Abfälle durch soziale oder politische Ereignisse (terroristische Angriffe, „Bürger“-Kriege oder soziale Unruhen) gefährdet werden könnten. Bisherige Erfahrungen in der Schweiz und Deutschland weisen darauf hin, dass existierende Institutionen nicht dafür gerüstet sind, solche Langzeitaufgaben adäquat auszufüllen. Vielmehr braucht es ein „lernendes System“, welches kooperativ agierende, lernende Organisationen umfasst, die die Aufgaben des zivilen Konfliktmanagements (Grunwald, 2010) erfüllen können. Welche Aufgaben müssen solche Institutionen über lange Zeiträume hinweg erfüllen können und welche Eigenschaften müssen sie aufweisen?

Die über lange Zeiträume zu erwartenden komplexen thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen (THMC) Prozesse gilt es messtechnisch zu erfassen. Die gemessenen Daten müssen sensibel interpretiert und in Entscheidungsgrundlagen sowie letztendlich Handlungen umgesetzt werden. Der Monitoring-Prozess beinhaltet sowohl die Sicherstellung der Robustheit der generierten Daten und der technischen Monitoring-Infrastruktur als auch die Interpretation der Daten. Das bedeutet, dass die zuständige Institution zur gleichen Zeit die Fähigkeit besitzt, am Endlager oder Oberflächenlager zu intervenieren und das dafür benötigte Wissen zu erhalten sowie dessen Weiterentwicklung zu fördern. Die Herausforderung besteht darin, den Zugang zu erforderlichlichem wissenschaftlichen Wissen, zur richtigen Technologie und zur benötigten

Infrastruktur sowie kompetentes Personal unter den gegebenen Bedingungen zu jeder Zeit über lange Zeit sicherzustellen. Um einer solchen Aufgabe auf lange Sicht gerecht werden zu können, ist es notwendig, dass die zuständige Institution dazu fähig ist, mit der Öffentlichkeit in einen Dialog zu treten und dafür zu sorgen, dass die politische Aufmerksamkeit gegenüber dem Thema Endlagerung aufrecht erhalten wird, um eine finanzielle Absicherung auf Dauer zu gewährleisten (Kuppler u. Hocke, 2018). Das bedeutet, dass diese Institution Eigenschaften einer hybriden Organisation aufweisen sollte, beispielsweise in der Form, dass diese Organisation dazu fähig sein sollte, über die Grenzen verschiedener gesellschaftlicher Subsysteme hinweg zu arbeiten und zu kommunizieren (Chadwick, 2017)⁶¹.

Am Monitoring wird eine Vielzahl von Akteuren in mehreren Institutionen beteiligt sein, welche koordiniert und kooperativ zusammenarbeiten müssen. Für die Koordination der Aufgaben sollte eine (Regierungs-)Organisation zuständig sein (Kuppler u. Hocke, 2018). In bestehenden Konzepten, wie dem der US-amerikanischen „long-term stewardship“, das an anderer Stelle ausführlich dargestellt ist, wird häufig davon ausgegangen, dass notwendige Handlungen fast automatisch erfolgen⁶². Die konzeptionellen Überlegungen zu Governance in ENTRIA (siehe Kapitel 5.2) fokussieren auf die Frage, wie Entscheidungsprozesse organisiert werden können, die einerseits bei der nuklearen Entsorgung den Schutz von Mensch und Umwelt sicherstellen und andererseits eine Vielzahl an Akteuren berücksichtigen und an wichtigen Stellen einbinden.

Der Staat legt dabei fest, unter welchen Bedingungen weitere Akteure in die Entscheidungsfindung eingebunden werden, und übernimmt – gerade auch nach der Neuregelung der Zuständigkeiten in Deutschland – die volle Verantwortung (Kuppler u. Hocke, 2018). Perspektivisch bedeuten die Erträge aus der Governance-Forschung auf nukleare Langzeitaufgaben angewendet immer auch das Festlegen von Aufgaben und Rollen sowie Institutionen und Prozessen (basierend auf Mayntz (2009) und Grande (2012)). Durch die Institutionen soll die Aufmerksamkeit für die Aufgabe über lange Zeitspannen hinweg aufrecht erhalten sowie das erforderliche Wissen bereitgestellt werden, das für einen verantwortungsvollen Umgang mit der Überwachung des Endlagers auch in ferner Zukunft notwendig ist. Die oberirdische Lagerung hoch radioaktiver Abfälle erfordert eine wesentlich intensivere Kontrolle als die tiefegeologische

⁶¹Der Begriff der hybriden Organisation betont, dass bei aktuellen Institutionalisierungen Wirtschaft, Politik und Wissenschaft mit ihren unterschiedlichen Typen von Wissen und systemischen Eigenlogiken zusammengebunden werden.

⁶²Metlay, D. (2016): Organizations Matter. Monitoring and Long-term-Governance, Workshop Technical Monitoring and Long-term Governance, Karlsruhe 18. - 19.10.2016

Endlagerung mit der Möglichkeit der Rückholbarkeit. Am wenigsten Überwachung erfordert ein tiefengeologisches Endlager ohne Rückholbarkeit. Eine Langzeitüberwachung ist dennoch für alle drei Optionen erforderlich, nur in unterschiedlicher Ausprägung (ebd.).

Welche Eigenschaften muss ein solches Institutionengefüge nun aufweisen, das von einer staatlichen Institution koordiniert wird? Aus Erfahrungen des Falls Asse II lässt sich die Lehre ziehen, dass mangelnde Transparenz und fehlende gegenseitige Kontrolle („checks and balances“) Fehler und Probleme hervorrufen, die vertuscht werden, anstatt diese aufzuarbeiten und daraus Lehren zu ziehen (Möller, 2016; Ilg u. a., 2017). Dies weist auf die Notwendigkeit von offener und nicht-hierarchischer Deliberation hin, die die Grundlage für Governance-Prozesse darstellt, in denen Individuen nicht dafür gestraft werden, wenn sie Pannen und Fehler aufdecken, sondern im Gegenteil dies als ein normaler und alltäglicher Prozess angesehen wird (vgl. Sträter (iE)).

Ein entsprechendes System, das bei eintretenden oder vermuteten Fehlern Warnrufe und das Erkunden von nicht zu erwartenden Sachverhalten honoriert, also in diesem Sinn „erkennungsfreundlich“ ist, bedarf weiterhin einer klaren Trennung der Verantwortlichkeiten. Mit Radkau u. Hahn (2013) sowie der Arbeit von (Möller, 2009) kann gezeigt werden, dass Arbeitsteilungen bei der Aufsicht und beim Vorantreiben einer sicherheitsorientierten Endlager-Politik über weite Strecken nicht den Erfordernissen eines professionellen Vorgehens entsprachen. Eine zukünftige Maxime sollte sein, dass nur eine professionelle Kultur des Umgangs mit vermuteten Fehlentwicklungen positiv honoriert wird. Eine klare Trennung der Verantwortlichkeiten in einem Akteursnetzwerk, in dem Modi und Prinzipien der Kooperation bekannt sind, ist notwendig, um die Zusammenarbeit einer Vielzahl von Akteuren über lange Zeiträume hinweg sicherzustellen (Kuppler u. Hocke, 2018). Ein entsprechendes „selbsthinterfragendes System“ im Sinne der Endlagerkommission muss vor dem Hintergrund der deutschen Entsorgungserfahrungen erst aufgebaut werden (Endlagerkommission, 2016, S. 276ff).

Die Unterschiedlichkeit der genannten Aufgaben – beispielsweise die Umsetzung einer Fehlerkultur, die Koordination verschiedenster Stakeholder sowie die Etablierung von Checks and Balances – lässt darauf schließen, dass verschiedene Institutionen mit einem ausbalancierten interaktiven System benötigt werden. Dazu gehören erstens Institutionen, die die Fähigkeit besitzen, Entscheidungen auf der Grundlage von begrenztem Wissen zu treffen. Bezogen auf die Eigenschaften von Governance bedeutet das, dass diese Institutionen fähig sein müssen, verschiedene Stakeholder zu koordinieren und mit verschiedenen kollektiven

Akteuren zu kooperieren („Entscheidungsträger“). Zweitens werden Institutionen benötigt, die das wissenschaftliche Wissen aufrechterhalten und fortentwickeln können („Wissenschaft“); drittens sind Institutionen gemeint, die ausreichend wissenschaftliches Wissen aufweisen, um die wissenschaftliche Fortentwicklung zu begleiten und zu beraten („Aufsichtsbehörden“ und „Forschungsmanagement“) und viertens Institutionen, welche die Ausführung konkreter technischer Aufgaben vor Ort am Endlager / Oberflächenlager übernehmen können („Vorhabenträger“). Diese Art der Institutionenlandschaft gibt es auch heute schon. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass zukünftig Institutionen dazu fähig sein müssen, sich an wandelnde Umweltgegebenheiten anzupassen und mit geringer werdender Aufmerksamkeit und mit einer Reduktion der Ressourcenausstattung zurechtzukommen (Kuppler u. Hocke, 2018).

Flexibilität, so ein Ergebnis aus diesem interdisziplinären ENTRIA-Schwerpunkt, ist in einer solchen Long-term Governance in zweifacher Hinsicht notwendig: erstens um auf natürliche Prozesse im Tiefenlager zu reagieren, die durch die Einlagerung radioaktiver Abfälle hervorgerufen werden, und zweitens, um Transparenz, Professionalität und ein historisches Bewusstsein zu erhalten. Langzeitplanung im Sinne von Long-term Governance ist eine Möglichkeit für die heute verantwortlichen Akteure und Institutionen, die Hoffnung zu verbreiten, dass verantwortlich mit dem Problem der Entsorgung der hoch radioaktiven Abfälle umgegangen wird (Kuppler u. Hocke, 2018).

3.7.6 Hauptergebnisse aus der Governance-Forschung

1. Governance als Modus der Kooperation und Koordination zu verstehen, hat sich bei der Bearbeitung als tragfähiges Konzept für die Entsorgungsforschung erwiesen. Dieses Konzept konnte auch bei der Reflexion der Entsorgungspolitik verschiedener Länder eingesetzt werden, wenn es darum ging, die verschiedenen nationalen Endlagerpolitiken zu vergleichen und dabei die jeweiligen sozialen Innovationen zu untersuchen. Damit wird eine wichtige Forschungslücke gefüllt. Insgesamt lässt sich festhalten, dass gehaltvolle Partizipation bisher die Ausnahme ist.
2. Der Bericht der Endlagerkommission schlägt eine Reihe neuer Standards für die Gestaltung der Schnittstellen zwischen Öffentlichkeit, Wissenschaft und Politik vor. Diese Vorschläge wurden vom Gesetzgeber in der Überarbeitung des StandAG weitgehend übernommen. Trotz dieser erfolgreichen Umsetzung von Neuerungen im deutschen politischen System der Entscheidungsfindung für die verglei-

chende Endlagerstandortsuche für hoch radioaktive Abfälle wurden alte Konflikte nicht bearbeitet und bestehen somit weiter (wie die Gorlebenfrage und erwartete substanzielle Mitwirkungsrechte Betroffener bei technischen Großprojekten). Auch begrenzen sich die neuen Vorschläge für die Öffentlichkeitsbeteiligung weitgehend auf konsultative Formate.

3. Die Endlagerkommission hat bewiesen, dass eine produktive Auseinandersetzung mit dem deutschen Entsorgungskonflikt auch über die alten Konfliktlinien hinaus bis zu einem gewissen Grad machbar ist. Dass es mit der Verabschiedung des StandAG zu einer teilweisen Befriedung des Konflikts kommt, welche erlaubt, dessen Umsetzung komplikationslos zu starten, war zwar politisch gewünscht, gleichzeitig jedoch nicht zu erwarten. Wie die Umweltverbände und Bürgerinitiativen sich in der weiteren Umsetzung verhalten werden, d. h. ob der Konflikt sich wieder zuspitzt und neu manifestiert, bleibt abzuwarten.
4. Das ungewöhnliche Format der Endlagerkommission mit seiner hybriden Zusammensetzung war entgegen vieler Erwartungen erfolgreich. Eine große Kommission, die etwa zur Hälfte mit Parlamentarierinnen und Parlamentariern besetzt war und in der zweiten Hälfte die Zivilgesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft in ihrer Pluralität einzubinden versuchte, hat erstaunlicherweise auch unter Bedingungen der deutschen Konkurrenzdemokratie ein weitgehend konsensuell durch die Gesamtkommission verabschiedetes Ergebnis erreicht. Dies kann als Erfolg weniger etablierter Governanceformen betrachtet werden. Neue Arbeitsteilungen auf der Ebene von Verantwortung und Zuständigkeit wurden verabredet und institutionell durch die Neuverteilung mehrerer Geschäftsbereiche z. T. auf neue Einrichtungen (BfE und BGE) umgesetzt. D.h. eine klarere Trennung zwischen Aufsicht und dem Akteur, der für Entwicklung und Betrieb zuständig ist, wurde erreicht. Den klassischen Dilemmata im deutschen Mehrebenen-System wurde versucht durch einen Verantwortungstransfer von Länder- auf Bundesebene zu begegnen. Angemessene Mechanismen der Konfliktbearbeitung müssen allerdings erst noch etabliert werden.
5. Aus Endlagerpolitiken anderer Länder kann aufgrund von Prozessähnlichkeiten gelernt werden. In der deutschen Entsorgungspolitik sind beispielsweise die Schweizer Transparenzkultur und politische Erfahrungen in der Konzeption und Durchführung von Re-

gionalkonferenzen wenig reflektiert. Der Bedarf an wissenschaftsbasierter Zuarbeit wird über den gesamten Implementierungszeitraum des StandAG hoch sein. Dies betrifft insbesondere die unabhängige Forschung, welche nicht von den zuständigen Verfahrensträgern durchgeführt oder in Auftrag gegeben wird.

6. In der Forschungsliteratur zu Nicht-Wissen zeigt sich ein Wandel vom klassischen Verständnis des „Nicht-Wissens“ als „Noch-Nicht-Wissen“ hin zur Anerkennung sozialer Konstruktions- und Definitionsprozesse des nicht oder nicht abschließend Wissbaren. Das „Nicht-Wissbare“ und das „Nicht-abschließend-Wissbare“ sind auch Teil politischer Aushandlungsprozesse, die nun mehr in den analytischen Blick geraten. Bezogen auf die Entsorgungspolitik zeigt sich am schwedischen Fall, dass zentrale Akteure in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft weiterhin dem klassischen Verständnis von Nicht-Wissen anhängen und dieses Nicht-Wissen über komplexer strukturierte Risiko-Begriffe in einschlägige Sicherheitsanalysen einzuhegen versuchen. Mittels prozessualer Aufgliederung der Endlagerung in Prozessphasen – wie auch in Deutschland vorgenommen – mit je spezifischen Risikoabwägungen soll die Komplexität des Problems reduziert werden. Dadurch wird einerseits erläutert, dass Ungewissheiten und spezifische Formen des Nicht-Wissens adressiert sind und damit handhabbar werden. Andererseits von irreduziblen Nicht-Wissens-Beständen abgelenkt.
7. Die bisherige Planung beschränkt sich auf die Zeit bis zur Identifizierung eines Endlagerstandorts. Bereits zum jetzigen Zeitpunkt, d. h. in der Phase des Aufbaus der zuständigen Institutionen, sollte jedoch auch die Zeit danach mitbedacht werden, in der weiterhin robuste Governance-Strukturen benötigt werden, welche für einen sicheren und demokratisch-begleiteten Betrieb, Monitoring und Verschluss des Endlagers zuständig sind. Welche Eigenschaften Institutionen haben müssen, um über lange Zeiträume hinweg diese Aufgabe erfüllen zu können, wurde in Ansätzen erforscht, bedarf aber weiterer Präzisierung.
8. Debatten, Auseinandersetzungen und auch Konflikte werden durch eine gut ausgeführte Bürgerbeteiligung nicht vervielfacht, sondern als Chance für eine stetige Verbesserung des Verfahrens im Sinne des von der Endlagerkommission vorgeschlagenen lernenden Systems gesehen. Auch wird ein nach dem StandAG durchgeführtes Standortauswahlverfahren nicht immer linear verlaufen. Es wird zu

Fort- und Rückschritten kommen („Interaktion in Loops“), bei denen sich auch die Politik legitimiert einmischen und Entscheidungen treffen wird, die anderen Teilsystemen (Wissenschaft, Medien, politischen Parteien, Regionen etc.) nicht gefallen werden. Beteiligte Akteure sollten sich auf diese Konflikte einstellen und sie als „Normalität“ betrachten.

9. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass das klassische Expertendilemma durch soziale Prozesse, welche beispielsweise durch Bürgerbeteiligungsformate oder andere Formen der politischen Debatte abgedeckt werden könnten, zu lösen sein werden („soziale Schließung“ von Debatten oder öffentlichen Kontroversen). Dies stellt eine Herausforderung für alle beteiligten Akteure dar, da für die Standort- und Konzeptfestlegung einerseits das vorhandene Wissen als robust betrachtet werden muss. Andererseits ist mit der Entsorgungspolitik in einem stufenweisen Verfahren eine spezifische Flexibilität zu sichern, die Entscheidungen als Wahl zwischen Alternativen betrachtet. Im Zusammenhang mit Entscheidungsfindungsprozessen sollte die Rollenreflexion für alle Akteure gefördert werden. Der Verfahrensträger und die ihm zuarbeitenden Institutionen stehen in der Pflicht, eine tragfähige „Kultur der Konfliktbearbeitung“ zu etablieren, in welcher Minderheitenmeinungen nicht ignoriert werden, ein Verfahrensfortschritt innerhalb von Grenzen, auf die sich vorab geeinigt wurde, aber sichergestellt ist. In der Konfliktbearbeitung sind diskursive Lösungswege anzustreben, ebenso wie zivilgesellschaftliche Formen der Konfliktaustragung.
10. Es konnte zusammenfassend eine (nicht abschließende) Reihe von „Gelingensbedingungen“ für die Umsetzung eines auf zivile Konfliktbearbeitung setzendes Standortauswahlverfahren identifiziert werden: (a) Etablierung von Konfliktbearbeitung im Verfahren, die Konflikte als Normalität und sogar wünschenswert behandelt, (b) Diskussion über und gemeinsame Entwicklung einer arbeitsfähigen Transparenzkultur zwischen Wissenschaft, Öffentlichkeit und Politik, (c) öffentliche Reflexion über und Umgang mit Nichtwissen, (d) Anerkennen der „Gesellschaftsaufgabe“ Endlagerung – oder besser „Ewigkeitsaufgabe“ (Brunnengräber, 2015).
11. Aus Perspektive der Technikfolgenabschätzung fällt auf, dass zahlreiche Forschungslücken auf geologisch-technischer Ebene bestehen. Diese betreffen insbesondere Ungewissheiten, die nicht allein über numerisch-mathematische Verfahren adressiert werden

können. Sie werden zwar bei Modellierungen und Simulationen zur Barrierefunktion des geologischen Untergrunds angesprochen. Welche Effekte und Einflussnahmen auf sicherheitsrelevante Faktoren von den menschlichen Eingriffen ausgehen, die je nach Entsorgungskonzept (wartungsfrei / rückholbar) auftreten, und welche Balancen in der natürlichen Geologie gestört werden, ist durch Forschungen zwar vertieft bearbeitet. Die verschrifteten Forschungsergebnisse machen die Haupteckenkenntnisse und ihre Bedeutung jedoch an vielen Punkten nur unbestimmt erkennbar. Einflüsse, die infolge des Auffahrens eines Bergwerks, die in der Betriebsphase bei der Einlagerung von hoch radioaktiven, wärmeentwickelnden Abfällen entstehen, sind ebenso nur schwach ausgearbeitet, ähnliches gilt für Monitoring-Maßnahmen, insbesondere wenn sie über einen längeren Zeitraum in einem offengehaltenen Bergwerk durchgeführt werden (Mbah, 2016).

12. Die Standortsuche für ein Endlager weltweit und unabhängig von der Verfasstheit der jeweiligen politischen Systeme (etwa in China, Russland, Europa oder den USA) stellt ein vertracktes Unterfangen dar. Wenn ein „wicked problem“ als ineinandergreifendes stoffliches, technisches und soziales Demokratieproblem erfasst wird, müsste die Bearbeitung des Problems konzeptionell verändert werden. Die Positionen aller am Prozess interessierten Akteure in ihrer Vielfalt und Unterschiedlichkeit müssten festgestellt, beraten und verhandelt werden
13. Aber trotz aller Bemühungen sind nur Annäherungen an eine Ideallösung, „clumsy solutions“ (Verweij u. Thompson, 2006), realistisch, bei denen die Interessen, Wertvorstellungen und Positionen der unterschiedlichen Akteure austariert werden müssen. Das verlangt allen Akteuren Kompromisse ab. Aufgrund tiefgehender Differenzen bei Werten, Interessen und Präferenzen der Akteure, die unterschiedliche Ansichten zum Verfahren wie zu den erwünschten Ergebnissen haben, sind allerdings auch neue Konflikte unvermeidbar. Denn es handelt sich nicht zuletzt um Probleme, bei denen es zu negativen Rückkopplungsschleifen kommen kann.
14. Freiwilligkeit ist in Deutschland kein Kriterium der Standortauswahl und ist nicht im StandAG verankert (Willmann u. Schmidt, 2016). Freiwilligkeit als Standortkriterium könnte allerdings als ein Signal an die Öffentlichkeit angesehen werden, sich am Standort-suchprozess zu beteiligen. Der Begriff bzw. die damit verbundenen

Konzepte können darüber hinaus als Argumentations- und Klärungshilfe im öffentlichen Diskurs verstanden werden. Denn in Ländern, die in einer fortgeschrittenen Phase der Umsetzung sind, spielten freiwillige Suchprozesse eine wichtige Rolle (Di Nucci u. a., 2017).

15. Kompensationen können dazu beitragen mögliche Folgewirkungen aus dem Bau oder Betrieb einer Anlage zu mildern (z. B. Immobilienwertgarantien), tatsächliche oder vermeintliche Kosten im Falle eines Unfalles aufzufangen (z. B. Notfallfonds) oder die lokale Gemeinde für die getragenen Risiken und Belastungen durch Bau und Betrieb des Endlagers zu entschädigen (vgl. auch Carnes u. a. (1983)). Dabei muss die Entschädigung nicht unbedingt eine rein finanzielle sein (Claro, 2007). Designierten Standorten und deren umliegenden Gemeinden kann auch eine Verbesserung der Infrastruktur angeboten werden (z. B. superschnelles Internet, Kulturzentren), den Betroffenen Steuervergünstigungen und die Bereitstellung von öffentlichen Gütern oder arbeitsmarktpolitische Maßnahmen zur Entwicklung der Region (Di Nucci, 2016).
16. Eine eingehende Diskussion, ob es „reine“ Freiwilligkeit oder „gekaufte“ Freiwilligkeit überhaupt geben kann, über eine moralisch-ethische Bewertung oder eine Erörterung der Verteilungsgerechtigkeit kann hier nicht geführt werden (vgl. dazu Ott u. Smeddinck (2018)). Anhand der Analyse von verschiedenen Fallstudien in der Europäischen Union (Brunnengräber u. a., 2015) lassen sich jedoch Rahmenbedingungen erkennen, die zu „freiwilligen“ Reaktionen und Entscheidungen geführt haben können. Diese sind: eine starke Identifikation mit der Nuklearindustrie („nuclear communities“), eine wirtschaftliche Marginalisierung und geographische Abgeschiedenheit der Region sowie wirtschaftliche Interessen und Abhängigkeiten, die durch die Nuklearindustrie und von der dadurch induzierten Wertschöpfungskette entstanden sind (Di Nucci u. a., 2017).
17. Bei den vergleichenden Untersuchungen zu den Spannungsfeldern von Konfrontation, Kooperation oder Kooptation zeigte sich, dass nationale Wege sehr spezifisch ausgelegt und nur bedingt auf andere Länder übertragbar sind (Brunnengräber u. a., 2015; Di Nucci u. a., 2017). Dennoch konnten durch den Vergleich und die Synthese der Länderstudien einige konfliktverschärfende wie konfliktminimierende Faktoren bei der Standortsuche identifiziert und bewertet werden. So wurden Freiwilligkeit und die umstrittene Rolle von

Kompensationen sowie die unterschiedlichen Ausformungen derselben eingehend in den Blick genommen (Di Nucci u. Brunnengraber, 2017).

18. Aus den Studien zum NIMBY-Phänomen konnte geschlussfolgert werden, dass die Öffentlichkeit und die Gemeinden bei entsprechenden Kompensationen durchaus offen für einen Standort sein können, wenn die Vorbereitungs- und Aushandlungsprozesse von Anfang an transparent und offen gestaltet werden. So kann vermieden werden, dass Kompensationen als Ablasshandel, Bestechung oder unmoralisches Angebot angesehen werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass beide Faktoren der Standortbestimmung – Transparenz und Kompensationen – in einem schwierigen und komplexen Verhältnis zueinander stehen (Di Nucci, 2016). In Zukunft wird es darauf ankommen, diese Faktoren zu berücksichtigen und – unter größtmöglicher Beteiligung der Gesellschaft auszututieren.
19. Weiterhin wurde diskutiert, inwiefern sozio-kulturelle Faktoren wie „Vertrauen“, aber auch „Transparenz“ bei Entscheidungsprozessen für eine erfolgreiche Standortsuche ausschlaggebend sein können. Dabei wurde auf die Erfahrung der Länder zurückgegriffen, die in einer fortgeschrittenen Phase des Suchprozesses sind und deren Lösungsansätze komparativ analysiert wurden (Di Nucci u. Brunnengraber, 2017). In der Zusammenschau kann geschlussfolgert werden, dass die Unterstützung der potenziellen Standortgemeinden nicht (ausschließlich) auf Entschädigung basieren kann. Die Erfahrungen der skandinavischen Länder zeigen, dass ein weiteres Kernelement das Vertrauen in die Institutionen darstellt und dass die Bereitschaft, Verhandlungen und Vereinbarungen an die Gemeinden zu delegieren, vorhanden sein sollte. Doch dies bedeutet auch, dass die lokalen Behörden in der Lage sein müssen, Verhandlungen zu führen.

Diese gemeinsam entwickelten Hauptergebnisse aus der interdisziplinären ENTRIA-Governance-Forschung zeigen, dass den Steuerungsprozessen, insbesondere den Aspekten der Kooperation und Koordination, der Endlagerpolitik mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte. Einerseits können mit dem Governance-Konzept Entscheidungsprozesse besser beschrieben werden und andererseits bieten sich neue Möglichkeiten der Analyse alternativer Handlungsmöglichkeiten. Die internationalen Vergleiche der Endlagerpolitiken bestätigen dies und weisen darauf hin,

dass im Kontext der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle immer komplizierte Aushandlungsprozesse zu leisten sind. Hiermit wird auf eine Normalität letzterer verwiesen, die gekennzeichnet ist durch Rück- und Fortschritte und im Kontext von „wicked problems“ und doppelter Komplexität üblicherweise entstehen. Wissenschaftsbasiertes Handeln ist für eine Reflexion dieser Aushandlungsprozesse notwendig, um hinreichend flexibel und mit dem Ziel von robusten Entscheidungen reagieren zu können.

Literatur

- [Alcantara u. a. 2016] Alcantara, Sophia (Hrsg.); Bach, Nicolas (Hrsg.); Kuhn, Rainer (Hrsg.); Ullrich, Peter (Hrsg.): *Demokratietheorie und Partizipationspraxis: Analyse und Anwendungspotentiale deliberativer Verfahren*. Wiesbaden: Springer VS, 2016
- [Arnstein 1969] Arnstein, Sherry R.: A Ladder of Citizen Participation. In: *Journal of the American Institute of Planners (JAIP)* 35 (1969), Nr. 4, S. 216–224
- [Beck u. a. 1996] Beck, Ulrich; Giddens, Anthony; Lash, Scott; Rang, Philipp: *Reflexive Modernisierung: Eine Kontroverse*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1996
- [Benz 2004] Benz, Arthur: Einleitung: Governance - Modebegriff oder nützliches sozialwissenschaftliches Konzept? In: *Governance – Regieren in komplexen Regelsystemen*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2004, S. 11–28
- [Benz 2010] Benz, Arthur: Multilevel Governance – Governance in Mehrebenensystemen. In: *Governance – Regieren in komplexen Regelsystemen*. 2. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010, S. 125–146
- [Biegelbauer u. Hansen 2011] Biegelbauer, Peter; Hansen, Janus: Democratic Theory and Citizen Participation: Democracy Models in the evaluation of public participation in science and technology. In: *Science and Public Policy* 38 (2011), Nr. 8, S. 589–597
- [Biegelbauer u. Loeber 2010] Biegelbauer, Peter; Loeber, Anne: *The Challenge of Citizen Participation to Democracy*. Wien: Institut für Höhere Studien Wien, 2010 (94)

- [Brenner 2005] Brenner, Michael: Das Prinzip Parlamentarismus. In: *Handbuch des Staatsrechts der Bundesrepublik Deutschland III* Bd. 3. 3., völlig neubearbeitete und erw. Aufl. Heidelberg: C.F. Müller, 2005, S. 477–519
- [Brunnengräber 2015] Brunnengräber, Achim: *Ewigkeitslasten. Die „Endlagerung“ radioaktiver Abfälle als soziales, politisches und wissenschaftliches Projekt*. Baden-Baden: edition sigma, 2015
- [Brunnengräber 2016a] Brunnengräber, Achim: Das wicked problem der Endlagerung. Zehn Charakteristika des komplexen Umgangs mit hochradioaktiven Reststoffen. (Brunnengräber, 2016c), S. 145–166
- [Brunnengräber 2016b] Brunnengräber, Achim: Die atompolitische Wende. Paradigmenwechsel, alte und neue Narrative und Kräfteverschiebungen im Umgang mit radioaktiven Abfälle. (Brunnengräber, 2016c), S. 13–32
- [Brunnengräber 2016c] Brunnengräber, Achim (Hrsg.): *Problemfälle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll*. Baden-Baden: edition sigma, 2016
- [Brunnengräber u. a. 2015] Brunnengräber, Achim (Hrsg.); Di Nucci, Maria R. (Hrsg.); Isidoro Losada, Ana M. (Hrsg.); Mez, Lutz (Hrsg.); Schreurs, Miranda A. (Hrsg.): *Nuclear Waste Governance. An International Comparison*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
- [Brunnengräber u. Hocke 2014] Brunnengräber, Achim; Hocke, Peter: Bewegung Pro-Endlager? Zum soziotechnischen Umgang mit hochradioaktiven Reststoffen. In: *Forschungsjournal Soziale Bewegungen* 27 (2014), Nr. 4, S. 59–70
- [Brunnengräber u. Häfner 2015] Brunnengräber, Achim; Häfner, Daniel: Herrschaftsverhältnisse in der Mehrebenen-Governance der nuklearen Entsorgung. In: *Zeitschrift für Politikwissenschaft Sonderheft* 2015 (2015), Nr. 2, S. 55–72
- [Brunnengräber u. Mez 2014] Brunnengräber, Achim; Mez, Lutz: Strahlende Hinterlassenschaften aus Produktion und Konsumtion. Zur Politischen Ökonomie des Atommülls. In: *PROKLA. Zeitschrift für kritische Sozialwissenschaft* 44 (2014), Nr. 3, 371–382. <http://prokla.com/wp/wp-content/uploads/2014/Prokla176.pdf>

- [Brunnengräber u. a. 2014] Brunnengräber, Achim; Mez, Lutz; Di Nucci, Maria R.; Häfner, Daniel; Isidoro Losada, Ana M.: Nuclear Waste Governance – ein wicked Problem der Energiewende. In: Brunnengräber, Achim (Hrsg.); Di Nucci, Maria R. (Hrsg.): *Im Hürdenlauf zur Energiewende. Von Transformationen, Reformen und Innovationen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 389–399
- [Brunnengräber u. a. 2012] Brunnengräber, Achim; Mez, Lutz; Di Nucci, Maria Rosaria; Schreurs, Miranda: Nukleare Entsorgung. Ein wicked und höchst konfliktbehaftetes Gesellschaftsproblem. In: *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis (TaTuP)* 21 (2012), Nr. 3, S. 59–65
- [Brunnengräber u. a. 2016] Brunnengräber, Achim; Mez, Lutz; Schreurs, Miranda A.: Das Endlager-Dilemma. Über den Umgang mit Atom Müll. In: Leitschuh, Heike (Hrsg.); Michelsen, Gerd (Hrsg.); Simonis, Udo E. (Hrsg.); Sommer, Jörg (Hrsg.); Weizsäcker, Ernst U. (Hrsg.): *Jahrbuch Ökologie 2016* Bd. 2016. Stuttgart: S. Hitzel, 2016, S. 182–190
- [Bull 2014] Bull, Hans P.: Wissenschaft und Öffentlichkeit als Legitimationsbeschaffer. Eine kritische Analyse des Standortauswahlgesetzes. In: *Die Öffentliche Verwaltung* 67 (2014), Nr. 21, S. 897–907
- [Bundesamt für Strahlenschutz 2002] Bundesamt für Strahlenschutz (Hrsg.): *Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte*. Köln, 2002
- [Böhm 2011] Böhm, Monika: Bürgerbeteiligung nach Stuttgart 21: Änderungsbedarf und -perspektiven. In: *Natur und Recht* 33 (2011), Nr. 9, S. 614–619
- [Böschen 2016] Böschen, Stefan: *Wissenschafts- und Technikforschung*. Bd. 13: *Hybride Wissensregime. Skizze einer soziologischen Feldtheorie*. 1. Aufl. Baden Baden: Nomos, 2016
- [Carnes u. a. 1983] Carnes, Sam A.; Copenhaver, Emily D.; Sorensen Jon H.; Sonderstrom, E. J.; Reed, John H.; Bjornstad, D. J.; Peelle, Elizabeth: Incentives and Nuclear Waste Siting: Prospects and Constraints. In: *Energy System and Policy* 7 (1983), S. 323–351
- [Chadwick 2017] Chadwick, Andrew: *The Hybrid Media System. Politics and Power*. 2nd ed. Oxford: Oxford Univ. Press, 2017
- [Claro 2007] Claro, Edmundo: Exchange Relationships and the Environment: The Acceptability of Compensation in the Siting of Waste Disposal Facilities. In: *Environmental Values* 16 (2007), Nr. 2, S. 187–208

- [COWAM 2007] Cooperative Research on the Governance of Radioactive Waste Management: COWAM II. 2007 – Final synthesis report
- [Czada 2010] Czada, Roland: Good Governance als Leitkonzept für Regierungshandeln: Grundlagen, Anwendungen, Kritik. In: *Governance – Regieren in komplexen Regelsystemen*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010, S. 201–224
- [Czada 2016] Czada, Roland: Planen und Entscheiden als Steuerungsaufgabe und Interaktionsproblem. In: *Langfristiges Planen. Zur Bedeutung sozialer und kognitiver Ressourcen für nachhaltiges Handeln* Bd. 41. Berlin: Springer, 2016, S. 215–249
- [Dalton 2014] Dalton, Russell J.: *Citizen Politics. Public Opinion and Political Parties in Advanced Industrial Democracies*. Los Angeles: SAGE, CQ Press, 2014
- [Decker 2014] Decker, Frank: Volksgesetzgebung und parlamentarisches Regierungssystem. Eine schwierige Kombination. In: Münch, Ursula (Hrsg.); Hornig, Eike-Christian (Hrsg.); Kranenpohl, Uwe (Hrsg.): *Direkte Demokratie. Analysen im internationalen Vergleich* Bd. 7. Baden-Baden: Nomos Verlag, 2014, S. 23–37
- [Della Porta 2014] Della Porta, Donatella (Hrsg.): *Methodological practices in social movement research*. Oxford [u.a.]: Oxford Univ. Press, 2014
- [StandAG 2013] Deutscher Bundestag: *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG)*. Juli 2013 – Standortauswahlgesetz vom 23. Juli 2013 (BGBl. I S. 2553).
- [Di Nucci 2016] Di Nucci, Maria R.: NIMBY oder IMBY: Akzeptanz, Freiwilligkeit und Kompensationen in der Standortsuche für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. In: (Brunnengräber, 2016c), S. 119–143
- [Di Nucci u. Brunnengräber 2017] Di Nucci, Maria R.; Brunnengräber, Achim: In whose backyard? The wicked problem of siting nuclear waste repositories. In: *European Policy Analysis EPA – special issue „Infrastructure policy-making: between regional interests and societal goals?“* 3 (2017), Nr. 2, S. 295–323
- [Di Nucci u. a. 2017] Di Nucci, Maria R.; Brunnengräber, Achim; Isidoro Losada, Ana M.: From the „right to know“ to the „right to decide“. A Comparative Perspective on Participation and Acceptance in Siting Procedures for HLW repositories. In: *Progress in Nuclear Energy* (2017), Nr. 100, S. 316–326

- [Di Nucci u. Isidoro Losada 2015] Di Nucci, Maria R.; Isidoro Losada, Ana M.: An Open Door for Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Export? In: (Brunnengräber u. a., 2015), S. 79–97
- [Dolde 2013] Dolde, Klaus-Peter: Neue Formen der Bürgerbeteiligung? Planung und Zulassung von Projekten in der parlamentarischen Demokratie. In: *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht (NVwZ)* 32 (2013), Nr. 12, S. 769–775
- [Dryzek 1996] Dryzek, John S.: *The Politics of the Earth. Environmental Discourses*. Oxford: Oxford Univ. Press, 1996
- [Dryzek 2010] Dryzek, John S.: *Foundations and Frontiers of Deliberative Governance*. Oxford: Oxford Univ. Press, 2010
- [Drögemüller 2016] Drögemüller, Cord: Das Standortauswahlverfahren. Kommunen und BürgerInnen in der Endlager-Governance. In: (Brunnengräber, 2016c), S. 187–210
- [Drögemüller 2018] Drögemüller, Cord: *Schlüsselakteure der Endlager-Governance. Entsorgungsoptionen und -strategien aus Sicht regionaler Akteure*. Wiesbaden: Springer VS, 2018
- [Drögemüller u. Kuppler 2017] Drögemüller, Cord; Kuppler, Sophie: Bürger(innen) auf Standortsuche. Erwartungen in Deutschland, Erfahrungen aus der Schweiz. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2017), Nr. 2, S. 121–124
- [Eifert 2012] Eifert, Martin: Regulierungsstrategien. In: Hoffmann-Riem, Wolfgang (Hrsg.); Schmidt-Aßmann, Eberhard (Hrsg.); Voßkuhle, Andreas (Hrsg.): *Grundlagen des Verwaltungsrechts. Methoden, Maßstäbe, Aufgaben, Organisation* Bd. 1. 2. Aufl. München: Beck, 2012, S. 1319–1395
- [Elam u. Sundqvist 2011] Elam, Mark; Sundqvist, Göran: Meddling in Swedish success in nuclear waste management. In: *Environmental Politics* 20 (2011), Nr. 2, S. 246–263
- [DAEF 2016] Endlagerforschung, Deutsche A.: Partizipation im Standortauswahlverfahren für ein Endlager / Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Eggenstein-Leopoldshafen, Braunschweig, 2016 (K-MAT 59) – Forschungsbericht – 43 S.

- [Endlagerkommission 2016] Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Hrsg.). Deutscher Bundestag: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Verantwortung für die Zukunft: Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes / Deutscher Bundestag. Berlin, 2016 (18/9100) – Bundestagsdrucksache – 684 S.
- [Enquete-Kommission 1980] Enquete-Kommission „Zukünftige Kernenergie-Politik“: Bericht über den Stand der Arbeit und die Ergebnisse. <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/08/043/0804341.pdf>. Bonn, 1980 (8/4341) – Drucksache
- [EC 2001] Europäische Kommission: *Europäisches Regieren - Ein Weißbuch*. 2001
- [Franzius 2005] Franzius, Claudio: Governance und Regelungsstrukturen / Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung. 2005 (P 2005-201) – Forschungsbericht
- [Gallego Carrera u. Hocke 2016] Gallego Carrera, Diana; Hocke, Peter: Die Endlager-Kommission und ihr Konzept von Öffentlichkeitsbeteiligung in einem engen Zeitfenster. Denkanstöße und Implikationen zum Beteiligungsformat von Demos/Prognos für die Kommission. In: Müller, Monika C. (Hrsg.): *Endlagersuche*. Loccum, 2016 (Loccumer Protokolle), S. 103–118
- [Geißel 2009] Geißel, Brigitte: Participatory Governance: Hope or Danger for Democracy? A Case Study of Local Agenda 21. In: *Local Government Studies* 35 (2009), Nr. 4, S. 401–414
- [Geißel 2011] Geißel, Brigitte: *Kritische Bürger: Gefahr oder Ressource für die Demokratie?* Frankfurt/M.: Campus, 2011 (Studien zur Demokratieforschung)
- [Geißel u. a. 2014] Geißel, Brigitte; Roth, Roland; Collet, Stefan; Tillmann, Christina: Partizipation und Demokratie im Wandel – Wie verändert sich unsere Demokratie durch neue Kombinationen repräsentativer, deliberativer und direktdemokratischer Elemente? In: *Partizipation im Wandel*. Bertelsmann, 2014, S. 11–39
- [Grande 2012] Grande, Edgar: Governance-Forschung in der Governance-Falle? – Eine kritische Bestandsaufnahme. In: *Politische Vierteljahresschrift* 53 (2012), Nr. 4, S. 565–592

- [Grunwald 2008] Grunwald, Armin: *Technik und Politikberatung: philosophische Perspektiven*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 2008 (Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft 1901)
- [Grunwald 2010] Grunwald, Armin: Ethische Anforderungen an nukleare Endlager: Der ethische Diskurs und seine Voraussetzungen. In: *Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Gesellschaftliche Erwartungen und Anforderungen an die Langzeitsicherheit*. Karlsruhe, Berlin, Bonn, 2010, S. 73–84
- [Grunwald 2016] Grunwald, Armin: Wissensintegration auf dem Weg zur Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>. In: (Smeddinck u. a., 2016), 111–119
- [Gärditz 2015] Gärditz, Klaus F.: Die Entwicklung des Umweltsrechts in den Jahren 2013-2014: Umweltschutz im Zeichen von Verfahren und Planung. In: *Zeitschrift für Umweltpolitik & Umweltrecht* (2015), Nr. 4, S. 343–366
- [Habermas 1992] Habermas, Jürgen: *Faktizität und Geltung. Beiträge zur Diskurstheorie des Rechts und des demokratischen Rechtsstaats*. 1. Aufl. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1992
- [Haus 2010] Haus, Michael: *Transformation des Regierens und Herausforderungen der Institutionenpolitik*. 1. Aufl. Baden-Baden: Nomos, 2010 (Modernes Regieren Bd. 5)
- [Hien 2012] Hien, Eckart: Partizipation im Planungsverfahren. In: *Umwelt und Planungsrecht UPR-Zeitschrift für Wissenschaft und Praxis* (2012), S. 128–132
- [Hocke 2006] Hocke, Peter: Expertenkommunikation im Konfliktfeld der nuklearen Entsorgung in öffentlichkeitssoziologischer Perspektive. Zum Wandel von Expertenhandeln in demokratischen Gesellschaften. In: Hocke, Peter (Hrsg.); Grunwald, Armin (Hrsg.): *Wohin mit dem radioaktiven Abfall?* Berlin: edition sigma, 2006, S. 155–180
- [Hocke 2015a] Hocke, Peter: Erweiterte Öffentlichkeitsbeteiligung bei der nuklearen Entsorgung. Deutschland und Schweiz im Vergleich. In: Bognner, Alexander (Hrsg.); Decker, Michael (Hrsg.); Sotoudeh, Mahshid (Hrsg.): *Responsible Innovation. Neue Impulse für die Technikfolgenabschätzung*. Baden-Baden: edition sigma, 2015, S. 185–196

- [Hocke 2015b] Hocke, Peter: Nuclear Waste Repositories and Ethical Challenges. In: Wyss, Max (Hrsg.); Peppoloni, Silvia (Hrsg.): *Geoethics. Ethical Challenges and Case Studies in Earth Science*. Amsterdam: Elsevier, 2015, S. 359–367
- [Hocke u. Gloede 2006] Hocke, Peter; Gloede, Fritz: Collective Action of Experts in a Stalemate Situation. Central Results of Evaluative Research on the Work of 'AkEnd' in Germany. In: *Disposal of Radioactive Waste: Forming a New Approach in Germany. FSC Workshop Proceedings Hitzacker and Hamburg, Germany, 5-8 October 2004*. Paris: OECD, 2006, S. 91–96
- [Hocke u. Kuppler 2015] Hocke, Peter; Kuppler, Sophie: Participation under Tricky Conditions. The Swiss Nuclear Waste Strategy Based on the Sectoral Plan. In: (Brunnengräber u. a., 2015), S. 157–176
- [Hocke u. a. 2018] Hocke, Peter (Hrsg.); Kuppler, Sophie (Hrsg.); Smeddinck, Ulrich (Hrsg.); Hassel, Thomas (Hrsg.): *Technisches Monitoring und Long-term Governance*. Baden-Baden: edition sigma, 2018 – In Vorbereitung
- [Hocke u. Renn 2011] Hocke, Peter; Renn, Ortwin: Concerned Public and the Paralysis of Decision-Making: Nuclear Waste Management Policy in Germany. In: *Nuclear Waste Management in a Globalised World*. Abingdon: Routledge, 2011, S. 43–62
- [Hocke u. Smeddinck 2017] Hocke, Peter; Smeddinck, Ulrich: Robust-parlamentarisch oder informell-partizipativ? Die Tücken der Entscheidungsfindung in komplexen Verfahren. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2017), Nr. 2, S. 125–128
- [Häfner 2016] Häfner, Daniel: Die Politikwissenschaft und Nuclear Waste Governance. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>. In: (Smeddinck u. a., 2016), 9–12
- [Ilg u. a. 2017] Ilg, Patrick; Gabbert, Silke; Weikard, Hans-Peter: Nuclear Waste Management under Approaching Disaster: A Comparison of Decommissioning Strategies for the German Repository Asse II. In: *Risk Analysis* 37 (2017), Nr. 7, S. 1213–1232
- [Ismayr 2012] Ismayr, Wolfgang: *Der Deutsche Bundestag*. 3. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2012

- [Jacob u. a. 2007] Jacob, Klaus; Biermann, Frank; Busch, Per-Olof; Feindt, Peter H.: Einleitung: Politik und Umwelt. Modernisierung politischer Systeme als Herausforderung an die Politikwissenschaft. In: Jacob, Klaus (Hrsg.); Biermann, Frank (Hrsg.); Busch, Per-Olof (Hrsg.); Feindt, Peter H. (Hrsg.): *Politik und Umwelt*. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2007 (Politische Vierteljahresschrift, Sonderheft 39), S. 11–41
- [Jänicke 1987] Jänicke, Martin: *Staatsversagen. Die Ohnmacht der Politik in der Industriegesellschaft*. 2. Aufl. München: Piper, 1987
- [Krick 2013] Krick, Eva: *Verhandlungen im Konsensverfahren: Varianten kollektiver Entscheidung in Expertengremien*. Wiesbaden: Springer VS, 2013
- [Krohn u. a. 2017] Krohn, Wolfgang; Grunwald, Armin; Ukowitz, Martina: Transdisziplinäre Forschung revisited: Erkenntnisinteresse, Forschungsgegenstände, Wissensform und Methodologie. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2017), Nr. 4, S. 341–347
- [Kuppler 2016] Kuppler, Sophie: Modellfall(e) Schweiz. Was aus der Standortsuche gelernt und generalisiert werden kann. In: (Brunnengräber, 2016c), S. 339–358
- [Kuppler 2017] Kuppler, Sophie: *Effekte deliberativer Ereignisse in der Endlagerpolitik. Deutschland und die Schweiz im Vergleich von 2001 bis 2010*. Wiesbaden: Springer VS, 2017
- [Kuppler u. Hocke 2015] Kuppler, Sophie; Hocke, Peter: “Enabling” public participation in a social conflict. The role of long-term planning in nuclear waste governance. <http://www.academia.edu/14483549/>. Karlsruhe, 2015 – Interner Bericht
- [Kuppler u. Hocke 2018] Kuppler, Sophie; Hocke, Peter: The role of long-term planning in nuclear waste governance. In: *Journal of Risk Research* (2018) – Im Erscheinen
- [König 2012] König, Wolfram: Wie kann die langfristige sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle gelingen? Zum Entwurf eines Standortauswahlgesetzes. In: *Zeitschrift für Neues Energierecht* 16 (2012), Nr. 3, S. 232–238
- [Lange u. Schimank 2004] Lange, Stefan; Schimank, Uwe: Governance und gesellschaftliche Integration. In: Lange, Stefan (Hrsg.); Schimank, Uwe (Hrsg.): *Governance und gesellschaftliche Integration*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2004, S. 9–44

- [Lietzmann 2016] Lietzmann, Hans J.: Die Demokratisierung der Repräsentation: Dialogische Politik als neue Form der repräsentativen Demokratie. In: *Politik mit Bürgern – Politik für Bürger. Praxis und Perspektiven einer neuen Beteiligungskultur*. Wiesbaden: Springer VS, 2016, S. 41–57
- [Linden 2016] Linden, Markus: Beziehungsgleichheit als Anspruch und Problem politischer Partizipation. In: *Zeitschrift für Politikwissenschaft* 26 (2016), Nr. 2, S. 173–195
- [Mayntz 2009] Mayntz, Renate: Von politischer Steuerung zu Governance? Überlegungen zur Architektur von Innovationspolitik (2008). In: Mayntz, Renate (Hrsg.): *Über Governance. Institutionen und Prozesse politischer Regelung*. Frankfurt/M., New York: Campus, 2009, S. 105–120
- [Mbah 2016] Mbah, Melanie: Bergwerk als technologisches Artefakt. Ein Beitrag zur untertägigen Entsorgung radioaktiver Abfälle aus Perspektive der Technikfolgenabschätzung. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover / Karlsruhe, 2016 (6) – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Mbah 2017] Mbah, Melanie: Partizipation und Deliberation als Schlüsselkonzepte im Konflikt um die Endlagerung radioaktiver Abfälle? Herausforderungen für die repräsentative Demokratie / Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse. Karlsruhe, 2017 (2017) – Interner Bericht
- [Mez 2006] Mez, Lutz: Zur Endlagerfrage und der nicht stattfindenden sozialwissenschaftlichen Endlagerforschung in Deutschland. In: *Wohin mit dem radioaktiven Abfall? Perspektiven für eine sozialwissenschaftliche Endlagerforschung*. Berlin: edition sigma, 2006, S. 37–52
- [Möller 2009] Möller, Detlev: *Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland. Administrativ-politische Entscheidungsprozesse zwischen Wirtschaftlichkeit und Sicherheit, zwischen nationaler und internationaler Lösung*. Frankfurt/M.: Peter Lang Internationaler Verlag der Wissenschaften, 2009
- [Möller 2016] Möller, Detlev: Zur Geschichte des Endlagers Asse II (1964 - 2009) und ihrer heutigen Relevanz. In: *Rückholung der Nuklearabfälle aus dem früheren Forschungsbergwerk Asse II. Dokumentation einer Vortragsreihe am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2016 (KIT Scientific Working Papers 47), S. 9–24

- [Neidhardt 1994] Neidhardt, Friedhelm (Hrsg.): *Öffentlichkeit, öffentliche Meinung, soziale Bewegungen*. 1994 (Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie Sonderhefte 34)
- [Offe 2008] Offe, Claus: Governance – Empty Signifier oder sozialwissenschaftliches Forschungsprogramm? In: Schuppert, Gunnar F. (Hrsg.); Zürn, Michael (Hrsg.): *Governance in einer sich wandelnden Welt* Bd. 41. Wiesbaden: Springer, 2008, S. 61–76
- [Ott u. Smeddinck 2018] Ott, Konrad (Hrsg.); Smeddinck, Ulrich (Hrsg.): *Umwelt, Gerechtigkeit, Freiwilligkeit – insbesondere bei der Realisierung eines Endlagers*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2018
- [Peters 2015a] Peters, Birgit: Befriedet Beteiligung den Endlagerstreit? Deutsche und Schweizer Endlagersuche im Vergleich. In: *Die Öffentliche Verwaltung* 68 (2015), Nr. 15, S. 629–637
- [Peters 2015b] Peters, Birgit: Die Bürgerbeteiligung nach dem Energiewirtschafts- und Netzausbaubeschleunigungsgesetz. Paradigmenwechsel für die Öffentlichkeitsbeteiligung im Verwaltungsverfahren? In: *Dokumentation zur 38. Wissenschaftlichen Fachtagung der Gesellschaft für Umweltrecht e. V. Leipzig 2014*. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2015, S. 161–194
- [Radkau u. Hahn 2013] Radkau, Joachim; Hahn, Lothar: *Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft*. München: Oekom, 2013
- [Raetzke 2014] Raetzke, Christian: INLA-Tagung in Buenos Aires. Entwicklungen im Atomrecht. In: *atw - International Journal for Nuclear Power* 59 (2014), Nr. 12, S. 670–674
- [Rittel u. Webber 1973] Rittel, Horst W. J.; Webber, Melvin M.: Dilemmas in a General Theory of Planning. In: *Policy Sciences* 4 (1973), Juni, Nr. 2, S. 155–169
- [Ritter 1992] Ritter, Ernst-Hasso: Von den Schwierigkeiten des Rechts mit der Ökologie. In: *Die Öffentliche Verwaltung* 45 (1992), S. 641–649
- [Roose 2010] Roose, Jochen: Der endlose Streit um die Atomenergie. Konfliktsoziologische Untersuchung einer dauerhaften Auseinandersetzung. In: Feindt, Peter (Hrsg.); Saretzki, Thomas (Hrsg.): *Umwelt- und Technikkonflikte*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010, S. 79–103

- [Rosa 2016] Rosa, Hartmut: *Resonanz. Eine Soziologie der Weltbeziehung*. 1. Aufl. Berlin: Suhrkamp, 2016
- [Roth 2011] Roth, Roland: *Bürgermacht. Eine Streitschrift für mehr Partizipation*. Hamburg: edition Körber-Stiftung, 2011
- [Roth u. Rucht 2008] Roth, Roland (Hrsg.); Rucht, Dieter (Hrsg.): *Die sozialen Bewegungen in Deutschland seit 1945. Ein Handbuch*. Frankfurt/M.: Campus, 2008
- [Roßnagel u. a. 2014] Roßnagel, Alexander; Ewen, Christoph; Götz, Konrad; Hefter, Tomas; Hentschel, Anja; Hüge, Antonia; Schönfelde, Carla: Mit Interessengegensätzen fair umgehen – zum Einbezug der Öffentlichkeit in Entscheidungsprozesse zu dezentralen Energieanlagen. In: *ZNER* 18 (2014), Nr. 4, S. 329–337
- [Rucht 2008] Rucht, Dieter: Die Anti-Atomkraftbewegung. In: Roth, Roland (Hrsg.); Rucht, Dieter (Hrsg.): *Die sozialen Bewegungen in Deutschland seit 1945. Ein Handbuch*. Frankfurt/M.: Campus, 2008, S. 245–266
- [Röhlig u. a. 2014] Röhlig, Klaus-Jürgen; Walther, Clemens; Bach, Friedrich-Wilhelm; Brunnengräber, Achim; Budelmann, Harald; Chaudry, Saleem; Eckhardt, Anne; Geckeis, Horst; Grunwald, Armin; Hassel, Thomas; Hocke, Peter; Lux, Karl-Heinz; Mengel, Kurt; Metz, Volker; Ott, Konrad; Plischke, Elmar; Riemann, Moritz; Smeddinck, Ulrich; Schreurs, Miranda A.; Stahlmann, Joachim: Memorandum zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe. https://www.entria.de/fileadmin/entria/Dokumente/ENTRIA_Memorandum_140430.pdf. Hannover, 2014 – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Röthel 2011] Röthel, Anne: *Techniksteuernde Grenzwerte – Wahrnehmungsstillstand und Zukunftsaufgabe*. 2011
- [Rütter u. a. 2005] Rütter, Heinz; Umbach-Daniel, Anja; Berwert, Adrian; Rütter-Fischbacher, Ursula: Nukleare Entsorgung in der Schweiz. Untersuchung der sozioökonomischen Auswirkungen von Entsorgungsanlagen. Band II: Fallstudien und Ergebnisse der Bevölkerungsbefragung. Rüschlikon, Lausanne, 2005 – Forschungsbericht – 231 S – Im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE
- [Saward 2016] Saward, Michael: Fragments of Equality in Representative Politics. In: *Critical Review of International Social and Political Philosophy* 19 (2016), Nr. 3, S. 245–262

- [Schink 2011] Schink, Alexander: Öffentlichkeitsbeteiligung – Beschleunigung – Akzeptanz: Vorschläge zur Verbesserung der Akzeptanz von Großprojekten durch Öffentlichkeitsbeteiligung. In: *Deutsches Verwaltungsblatt* 126 (2011), Nr. 22, S. 1377–1385
- [Schreurs u. a. 2014] Schreurs, Miranda A.; Brunnengräber, Achim; Di Nucci, Maria R.; Mez, Lutz: Endlager-Governance im internationalen Vergleich. In: Geschäftsstelle Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Hrsg.): *Beratungsunterlage zu TOP 3 der 6. Sitzung Zusammenfassung des Kurzvortrags von Prof. Dr. Miranda Schreurs* Bd. K-Drs. 65. Berlin: Geschäftsstelle Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, 2014
- [Schuppert 2005] Schuppert, Gunnar F.: *Schriften zur Governance-Forschung*. Bd. 2: *Der Gewährleistungsstaat – Ein Leitbild auf dem Prüfstand*. Baden-Baden: Nomos, 2005
- [Schuppert 2007] Schuppert, Gunnar F.: Was ist und wozu Governance? In: *Die Verwaltung – Zeitschrift für Verwaltungsrecht und Verwaltungswissenschaften* 40 (2007), Nr. 4, S. 463–511
- [Schuppert 2012] Schuppert, Gunnar F.: Politikvermittlung als Kommunikation. In: Kersten, Jens (Hrsg.); Schuppert, Gunnar F. (Hrsg.): *Politikwechsel als Governanceproblem*. Baden-Baden: Nomos, 2012 (Schriften des Münchner Centrums für Governance-Forschung), S. 45–69
- [Schön 2013] Schön, Wolfgang: Grenzen der Rechtsdurchsetzung. In: Flick, Corinne M. (Hrsg.): *Kollektiver Rechtsbruch*. Göttingen: Wallstein, 2013, S. 21–34
- [Smeddinck 2016] Smeddinck, Ulrich: Synergien oder Reibungsverluste? Wer koordiniert die Institutionen/Aktivitäten und führt sie zusammen? In: *Loccumer Protokolle. Endlagersuche. Endlager-Kommission und Öffentlichkeit(en): Fragen nach Zusammenarbeit und Fortschritten im Prozess zur Halbzeit der Kommission* Bd. 2014. Rehburg-Loccum: Evangelische Akademie Loccum, 2016, S. 69–80
- [Smeddinck 2017a] Smeddinck, Ulrich: Die Fortentwicklung des StandAG - Gesetzgebungsgeschichte, Beispiele, Reflektionen. In: *EurUP-Zeitschrift für Europäisches Umwelt- und Planungsrecht* 2017 (2017), Nr. 3, S. 195–295
- [Smeddinck 2017b] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.): *StandAG. Standortauswahlgesetz. Kommentar*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2017

- [Smeddinck u. a. 2016] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.); Kuppler, Sophie (Hrsg.); Chaudry, Saleem (Hrsg.): *Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016 <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>
- [Smeddinck u. Roßegger 2013] Smeddinck, Ulrich; Roßegger, Ulf: Partizipation bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe - unter besonderer Berücksichtigung des Standortauswahlgesetzes. In: *Natur+Recht* 35 (2013), Nr. 8, S. 548–556
- [Smeddinck u. Semper 2016] Smeddinck, Ulrich; Semper, Franziska: Zur Kritik am Standortauswahlgesetz. Eine rechtswissenschaftliche Sicht auf gesellschaftspolitische Debatten. In: (Brunnengräber, 2016c), S. 235–260
- [Smeddinck u. Willmann 2014] Smeddinck, Ulrich; Willmann, Sebastian: Die Kommissionsempfehlung nach § 4 Abs. 5 Standortauswahlgesetz. In: *Zeitschrift für Europäisches Umwelt- und Planungsrecht* 12 (2014), Nr. 2, S. 102–111
- [Smith 2009] Smith, Graham: *Democratic innovations. Designing institutions for citizen participation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009 (Theories of institutional design)
- [Spieker u. Bachl 2013] Spieker, Arne; Bachl, Marko: Sonderfall statt Prototyp. Eine prozedurale und empirische Analyse der Schlichtung zu Stuttgart 21. In: Römmele, Andrea (Hrsg.); Schober, Henrik (Hrsg.): *The Governance of Large-Scale Projects*. Baden-Baden: Nomos, 2013 (Schriftenreihe Kommunikation in Politik und Wirtschaft), S. 244–269
- [Stehr 2003] Stehr, Nico: *Wissenspolitik. Die Überwachung des Wissens*. 1. Aufl. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 2003 (Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft 1615)
- [Stender-Vorwachs 2015] Stender-Vorwachs, Jutta: Stärkung der Bürgerbeteiligung bei der Vorhabenplanung. In: *Niedersächsische Verwaltungsblätter* (2015), Nr. 6, S. 153–158
- [Sträter iE] Sträter, Oliver: Bedeutung von Mensch und Organisation für eine dauerhafte Sicherheit von Entsorgungsoptionen. In: Hocke, Peter (Hrsg.); Kuppler, Sophie (Hrsg.); Hassel, Thomas (Hrsg.); Smeddinck, Ulrich (Hrsg.): *Technisches Monitoring und Long-term Governance*. Baden-Baden: Nomos, i.E.

- [Sutter 2005] Sutter, Barbara: Von Laien und guten Bürgern – Partizipation als politische Technologie. In: *Wozu Experten? Ambivalenzen der Beziehung von Wissenschaft und Politik*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2005, S. 220–240
- [Trute u. a. 2004] Trute, Hans-Heinrich; Denkhaus, Wolfgang; Kühlers, Doris: Governance in der Verwaltungsrechtswissenschaft. In: *Die Verwaltung – Zeitschrift für Verwaltungsrecht und Verwaltungswissenschaften* 37 (2004), S. 451–474
- [Verweij u. Thompson 2006] Verweij, Marco; Thompson, Michael: *Clumsy Solutions for a Complex World. Governance, Politics and Plural Perceptions*. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2006
- [Visschers u. Siegrist 2012] Visschers, Vivianne H. M.; Siegrist, Michael: Fair play in energy policy decisions: Procedural fairness, outcome fairness and acceptance of the decision to rebuild nuclear power plants. In: *Energy Policy* 46 (2012), Nr. C, S. 292–300
- [Voßkuhle 2012] Voßkuhle, Andreas: § 1. Neue Verwaltungsrechtswissenschaft. In: *Grundlagen des Verwaltungsrechts. Band I*. 2. Aufl. Berlin: C. H. Beck, 2012, S. 1–64
- [Walk 2008] Walk, Heike: *Partizipative Governance. Beteiligungsformen und Beteiligungsrechte im Mehrebenensystem der Klimapolitik*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2008
- [Weingart 2003] Weingart, Peter: *Wissenschaftssoziologie*. Bielefeld: Transcript, 2003 (Einsichten: Themen der Soziologie)
- [Wiegand 2014] Wiegand, Marc A.: Konsens durch Verfahren? Öffentlichkeitsbeteiligung und Rechtsschutz nach dem Standortauswahlgesetz im Verhältnis zum atomrechtlichen Genehmigungsverfahren. In: *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht (NVwZ)* 13 (2014), Nr. 33, S. 830–835
- [Willmann u. Schmidt 2016] Willmann, Sebastian; Schmidt, Philipp: Das Konzept der Freiwilligkeit bei der Entscheidung über einen Endlagerstandort – eine philosophische und rechtswissenschaftliche Betrachtung. In: Smeddinck, Ulrich (Hrsg.); Kuppler, Sophie (Hrsg.); Chaudry, Saleem (Hrsg.): *Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 89–104

[Wissenschaftsrat 2015] Wissenschaftsrat: Zum wissenschaftspolitischen Diskurs über Große gesellschaftliche Herausforderungen / Geschäftsstelle des Wissenschaftsrates. <https://www.wissenschaftsrat.de/download/archiv/4594-15.pdf>. Köln, 2015 (Drs 4594-15) – Positionspapier – 35 S.

[Wulf 2015] Wulf, Nele: Die schwedische Endlagersuche. Zur Rolle von Expertise und der Kommunikation von Wissen. Karlsruhe, 2015 – Interner Bericht

[Ziekow 2013] Ziekow, Jan: Frühe Öffentlichkeitsbeteiligung. Der Beginn einer neuen Verwaltungskultur. In: *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht (NVwZ)* 2013 (2013), Nr. 12, S. 754–760

3.8 Interdisziplinäre normative Analysen zu Gerechtigkeit

Fakten und Sachverhalte können nicht gänzlich neutral kommuniziert und realisiert werden. Vielmehr gewinnen sie ihre Bedeutung durch Bewertungen und Sinnzuschreibungen. Ethik und Recht sind die zentralen Disziplinen, um normative Bewertungen zu entwickeln, zu rechtfertigen und in anerkannte oder doch wenigstens nachvollziehbare Lösungen zu überführen.

Bezogen auf die Standortauswahl und Realisierung eines Endlagers sind Sicherheit und Gerechtigkeit die interdisziplinär ermittelten Grundkategorien der Bewertung, die im transversalen Arbeitspaket Ethik und Recht aufgegriffen wurden, um sie im Lichte der beiden Disziplinen zu entfalten und zu problematisieren (Abschnitt 3.8.1). Ausgangspunkt war die Überlegung, dass nur Lösungen realisiert werden können, die als sicher und gerecht wahrgenommen werden. Naturgemäß lag der Akzent der Betrachtungen weniger auf dem Aspekt der Sicherheit, der stärker naturwissenschaftlich-technisch rationalisierbar ist, sondern stärker auf dem Aspekt der Gerechtigkeit, der größeren Erörterungsbedarf auslöste. Anders als in der Umgangssprache gibt es nicht nur eine oder die Gerechtigkeit, sondern aus fachlicher Sicht sind unterschiedliche Dimensionen der Gerechtigkeit zu differenzieren, die den Streit und Auseinandersetzungen teils unbewusst prägen und deren transparente Ausweisung (Abschnitt 3.8.2) hilft Dinge zu ordnen und auseinanderzuhalten und darauf bezogen zu diskutieren und mit Maßnahmen zu reagieren. Die negative und immer noch anzutreffende Tradition der Unterscheidung zwischen den rational und vernünftig wägenden und agierenden Akteuren und denjenigen, die irrationalen Ängsten, ja Emotionen aufsitzen und die Wirklichkeit verkennen, gab Anlass, hier im Sinne moderner und weiterführender Konfliktlösungen tiefer zu schürfen und Emotionen als Rationalitäten eigener Art anzuerkennen und zu untersuchen (Abschnitt 3.8.3).

Drei speziellere Fragenkreise sind aufsetzend auf diesen Grundlagen teil dann im Rahmen der Kooperation von Ethik und Recht eingehender bearbeitet worden:

Erst auf einer erweiterten, gleichsam emotional-informierten Grundlage besteht die Hoffnung, die schon länger im Rahmen der Endlagerforschung ventilierten Konzepte, die Regionalentwicklung und Kompensationen mit der Realisierung eines Endlagers verknüpfen wollen und teils heftig abgelehnt werden, effektiv nutzen zu können, indem sie im Lichte von Ethik und Recht auch als Thema der inneren Wahrnehmungen und

Antriebe eingeordnet werden: Es ist das Gefühl der Gerechtigkeit, dass aus einer akzeptablen Lösung eine akzeptierte Lösung wachsen lassen kann. In Abkehr von der bisher diskutierten Terminologie der Freiwilligkeit, ein Endlager in der eigenen Region zu akzeptieren, wird hier der Begriff der Bereitwilligkeit vorgeschlagen und begründet (Abschnitt 3.8.4).

Die Langzeitperspektive, die die Entsorgung radioaktiver Abfälle in sich trägt, macht die Aufgabe automatisch und unweigerlich zur Aufgabe zwischen den Generationen. Neben der bloßen faktischen Aufgabe und Tangierung löst das vor allem Gerechtigkeitsfragestellungen aus, die nicht einfach zu beantworten sind (Abschnitt 3.8.5). Die immer weiter ausufernde zeitliche Perspektive bis zu dem Zeitpunkt, an dem ein Endlager zur Verfügung steht und befüllt werden kann, aktiviert noch wieder andere Fragestellungen, die sich an der langfristigen Oberflächenlagerung festmachen (Abschnitt 3.8.6). Schließlich werden zentrale Einsichten aus der Zusammenarbeit von Ethik und Recht formuliert (Abschnitt 3.8.7), die als grundlegendes orientierendes Basiswissen genutzt werden können, um die Chancen für die Realisierung eines Endlagers zu verbessern.

3.8.1 Einleitung

Das gesellschaftspolitische Problem der langfristigen Einlagerung hoch radioaktiver Reststoffe weist einen Schweregrad auf, der etablierte politische Routinen (Stichwort: Legitimation durch Verfahren) überfordern könnte, da das bzw. die Verfahren selbst unter bestimmten normativen Maßstäben (etwa solchen der Gerechtigkeit, siehe Abschnitt 3.8.2) hinterfragt werden können. Das Einlagerungs-Problem ist konflikträftig und unweigerlich mit vielfältigen Werturteilen, Risikoeinschätzungen, Narrativen, rechtlichen Regelwerken und moralischen Grundsätzen verwoben, sodass es keine rein „sachlich begründete“ Lösung geben kann. Die „Sache selbst“ erfordert ethische Reflexion und rechtliche Würdigung. Reflexion und Würdigung müssen allerdings so detailgenau wie möglich mit den empirischen Sachständen und Optionen vermittelt („konkretisiert“) werden. Andernfalls droht die Gefahr eines abstrakten bzw. abgehobenen Denkens, das nur generelle Prinzipien fixiert, die niemand ernsthaft bestreitet. Im Folgenden wird der Versuch des Transversalprojektes dargestellt, auf dem Wege ethischer Reflexion und juristischer Würdigung zu bestimmten Einsichten zu gelangen, die auch für die zukünftigen Lösungsstrategien relevant zu sein beanspruchen.

Bereits mit dem Memorandum (Röhlig u. a., 2014) legte ENTRIA den Fokus auf zwei prinzipielle Kriterien für die Bewertung von Optionen zur Einlagerung hoch radioaktiver Reststoffe: Sicherheit und Gerechtigkeit.

Eine erste Aufgabe der Ethik war die Bestimmung ihres deontischen Status'. Diese beiden prinzipiellen Kriterien, von denen Sicherheit mehr den technisch-naturwissenschaftlichen und Gerechtigkeit mehr den sozial- und geisteswissenschaftlichen Disziplinen zugeordnet wurden, sind zunächst einmal qualitative normative Postulate, die allgemein konsentiert werden. Sie bezeichnen basale Anforderungen an jede Einlagerungspolitik. Als solche dienen sie zwar der Ordnung und Kategorisierung von Inhalten, die später als Bewertungsgrundlagen dienen. Beide Postulate sind aber für sich genommen leer („abstrakt“) und bedürfen daher der Differenzierung, Spezifikation und der Konkretion. Sicherheit und Gerechtigkeit sind „prinzipiell“, insofern sie direkt an oberste Werte gebunden sind; sie sind aber bereits „kriteriell“, insofern sie auf dem Wege der Spezifikation bzw. Konkretion Unterschiede der Entsorgungsoptionen sichtbar machen sollen. Diese Systematik legen auch die Bewertungsgrundlagen zugrunde (Kapitel 4).

Für das Postulat der Sicherheit heißt dies, dass unterschieden werden muss zwischen qualitativen und quantifizierbaren („operationalisierten“) Sicherheitskonzepten, die jeweils zur Anwendung kommen, und für das Postulat der Gerechtigkeit, dass dies in die einzelnen Schichten ihrer Komplexität zergliedert werden muss (Abschnitt 3.8.2). Dabei lässt sich Sicherheit besser operationalisieren, d. h. quantifizieren als Gerechtigkeit. Dies mag ein Erklärungsgrund sein, warum Vertreter von Disziplinen, für die Quantifizierung methodisch zentral ist, das Postulat der Sicherheit hoch gewichten, während für sie Gerechtigkeit häufig „subjektiv“ bleibt.

Wir stellen einige grundsätzliche Überlegungen zum Postulat der Sicherheit voran, um anschließend das generelle Verhältnis beider Postulate besser bestimmen zu können:

In der eher technologischen, auf natur- und ingenieurwissenschaftlicher Arbeit und Methodik basierenden Forschung zur Verbringung von Reststoffen ist Sicherheit das leitende Prinzip. Es lässt sich zweiteilen in die Dimensionen von safety und security. Unter den Begriff der safety fallen die zu untersuchenden Sicherheitsfaktoren und -funktionen, welche für eine langfristige Isolierung der radioaktiven Stoffe von der Umwelt einschlägig sind, während security die Schutzfunktionen eines Lagers gegen ungewolltes menschliches Eingreifen bezeichnet (Röhlig u. a., 2014). „Ungewollt“ wiederum unterteilt sich seinerseits in „versehentlich“ und „missbräuchlich“, wobei „missbräuchlich“ Werturteile über unzulässige Intentionen eines zukünftigen Zugriffs auf die Reststoffe voraussetzt (wie etwa: „Der Einsatz radioaktiver Reststoffe ist in allen möglichen zukünftigen Konflikten unzulässig“). Ein „best“- oder „höchstmögliches“ Maß

an Sicherheit in beiden Dimensionen lässt sich menschenrechtlich begründen, wobei auch Mitgliedern zukünftiger Generationen moralische Rechte auf Schutz vor toxischen Immissionen zuerkannt werden (s. u. Abschnitt 3.8.5 zu zukünftigen Generationen). Aus Kants Ethik lässt sich die apodiktische Pflicht entnehmen, Mitmenschen und die Umwelt nicht ohne zwingenden Grund schädigen zu dürfen. Ein „no-harm“-Prinzip bzw. ein prinzipielles Schädigungsverbot findet sich in vielen Ethiktheorien. So hat schon Schopenhauer den obersten Grundsatz der Moral, „über dessen Inhalt alle Ethiker eigentlich einig sind, als „Neminem laede; imo omnes, quantum potes, iuva“ bestimmt⁶³.

Hoch radioaktive Reststoffe weisen ein hohes Schädigungspotential für lange Zeit auf. Wer sie erzeugt, hat damit anderen Personen eine strikte Pflicht auferlegt, diese Stoffe möglichst sicher von Mensch und Umwelt abzuschirmen. Man kann argumentieren, dass dieses Prinzip bereits durch die Produktion hoch radioaktiver Reststoffe zu einer Zeit, als kein sicheres Endlager verfügbar war, sondern nur in Aussicht stand (Gorleben), verstoßen wurde. Die Verantwortlichen für die damaligen Entscheidungen sind allerdings hochbetagt oder verstorben. Es macht weder rechtlich noch politisch Sinn, sie zur „Verantwortung“ ziehen zu wollen. Auch eine akribische historische Aufarbeitung führt uns einer praktischen Lösung nicht näher, sondern in die Glaubensmächte der Vergangenheit hinein. Die damaligen Akteure haben im Paradigma des „Atomzeitalters“ und im Rahmen der Legalität Entscheidungen getroffen, mit deren Konsequenzen zukünftige Generationen unausweichlich konfrontiert werden. Angesichts der rechtliche Selbstbindung, eine territoriale Lösung auf dem Gebiet der Bundesrepublik finden zu müssen, besteht die Verantwortung gemäß einem „no-harm“-Prinzip nunmehr in der Sicherheitsdimension, d. h. in der bestmöglichen Isolation der toxischen Substanzen von der Umwelt über einen extrem langen, d. h. geologischen Zeitraum. Dieses postulierte Höchstmaß an Sicherheit scheint eine normative Selbstverständlichkeit („Truismus“) zu sein, wirft aber bei reflexiver Betrachtung etliche diffizile Bewertungsfragen auf.

Auf der anderen Seite steht die eher sozialwissenschaftliche und geisteswissenschaftliche Erforschung unter dem Postulat der Gerechtigkeit. Sie stellt sich primär die Frage, wie Entsorgung als politischer Prozess, der sich über Jahrzehnte erstrecken wird, zu gestalten sei, wobei man diversen ethischen, sozialen und individuellen Ansprüchen nach einer möglichst „verträglichen“ Entsorgungsstrategie Rechnung tragen möchte. Das Postulat der Gerechtigkeit ist an oberste Werte wie etwa Demo-

⁶³(Schopenhauer, 1950, S. 137): „Verletze niemanden, vielmehr hilf allen, soweit du kannst.“

kratie und Rechtsfrieden gebunden; für Rawls ist es die oberste Tugend politischer Institutionen. Aus einer eher funktionalen Perspektive lässt sich darauf hinweisen, dass empfundene Gerechtigkeitsdefizite zu heftigen politischen Konflikten führen könnten, die es, soweit möglich, zu vermeiden gilt. Wir setzen hypothetisch einen Nexus zwischen Gerechtigkeit und Frieden voraus, der schon in der jüdischen Antike geltend gemacht wurde: Ungerechtigkeit führt zu Unfrieden und Unfrieden führt zu immer neuen Ungerechtigkeiten. Mit Blick auf Emotionen (Abschnitt 3.8.3) ist darauf hinzuweisen, dass empfundene Ungerechtigkeit mit den Gefühlen von Empörung und Entrüstung quittiert werden, denen hohes Mobilisierungspotential innewohnt. Das allgemeine Gerechtigkeitspostulat erweist sich in der Konkretion allerdings als extrem komplex (Abschnitt 3.8.2).

Diese skizzierte Unterscheidung beider Postulate impliziert keine disjunktive, also nicht vermengende Trennung der beiden normativen Dimensionen („Sphären“), da die beiden Postulate „Sicherheit“ und „Gerechtigkeit“ auch ineinandergreifen und ständig aufeinander bezogen bleiben müssen. Sicherheitsbezogene Entscheidungen wirken sich auch auf Gerechtigkeitsaspekte aus und umgekehrt, z. B. bei einer Verteilung bzw. Konzentration von Risiken. Jedenfalls muss eine gerechte Entsorgung ebenso sicher sein, wie eine sichere Entsorgung gerecht sein soll. So wird eine prima facie gerechte Entsorgung gleichsam als ungerecht empfunden werden, wenn zugunsten der Fairness Sicherheit diskontiert wird, und eine nach Stand von Wissenschaft und Technik größtmögliche Sicherheit wird defizitär bleiben, wenn das Verfahren ihrer Implementierung den normativen Ansprüchen der Gerechtigkeit nicht genügt. Die beiden Postulate stehen somit zueinander im Verhältnis einer wechselseitigen normativen Voraussetzung. Technisch gesprochen, sind beide Postulate strikt korrelativ, d. h. das jeweils andere Kriterium ist ständig mit zu bedenken. Eine Korrelation liegt vor, wenn man, sobald man A denkt, B immer zugleich mitbedenken muss. (Die denkerische Aufgabe besteht somit darin, die Relata als Korrelate je für sich zu analysieren.)

In dieser und anderer Weise können die Forderungen nach Gerechtigkeit und Sicherheit auch in Konkurrenz treten, auf der Makroebene der Metakriterien ebenso, wie auf der Mikroebene ihrer Differenzierungen. Es handelt sich also um das metaethische Verhältnis einer wechselseitigen korrelativen normativen Voraussetzung, in die auf dem Wege der Konkretion mehrere Trade-Offs, also gegenläufiger Abhängigkeiten, eingelassen sind. In diesem Sinn kann man metaethisch erklären, warum inhaltlich „der Teufel im Detail steckt“. Diese metaethische Erklärung nötigt wiederum der normativen Ethik selbst ein Höchstmaß an Konkretion bzw. Detail-

genauigkeit ab, das von generellen Ethiktheorien nicht erreicht wird. Daher führt eine Rekonstruktion der theoretischen Kerne konkurrierender Ethiktheorien (Kantianismus, Utilitarismus, Kontraktualismus, Aristotelismus, Diskursethik, hierzu Ott (2005)) in der Sache nicht weiter.

3.8.2 Gerechtigkeit: Prozessqualität, Verteilung, Bereitwilligkeit

Die Entsorgung radioaktiver Reststoffe wird an verschiedenen Gerechtigkeitsnormen gemessen oder beurteilt. Gerechtigkeit ist ein ethischer Grundbegriff, der seit der Antike reflektiert wird⁶⁴. Wenn wir von ihren theologischen Wurzeln absehen und sie nicht als das Privileg der Götter oder eines Gottes betrachten, dem Menschen entsprechen sollen (etwa die Zeddekiha der hebräischen Bibel), so finden wir die Gerechtigkeit in der Antike zunächst als eine zentrale Tugend. Bei Plato mündet die Frage nach Gerechtigkeit in die Konstruktion eines perfekten Staatswesens („Politeia“), wodurch die Tradition der Staatsutopien eröffnet wird. Diese ist für uns uninteressant. Bei Aristoteles hingegen finden wir eine robuste Grobanalyse von Gerechtigkeitsdimensionen, die sich als überraschend problemadäquat erwies.

Aristoteles

Aristoteles unterscheidet in seiner „Nikomachischen Ethik“ zunächst in zwei Grundkategorien der Gerechtigkeit. Die politische Gerechtigkeit ist allgemein, distributive und kommutative sind besondere Formen der Gerechtigkeit. Mit Aristoteles unterscheiden wir zwischen a) politischer Gerechtigkeit, b) distributiver Gerechtigkeit und c) sog. „kommutativer“ Gerechtigkeitsnormen, die freiwillige oder unfreiwillige Verkehrsformen regulieren (Verträge und Delikte). Diese Einteilung erwies sich als erstaunlich einschlägig, d. h. problemadäquat. Sie findet sich auch in neuen Theorien. Im Anschluss an Aristoteles lässt sich mit Nadja Mazouz eine systematische Dreiteilung von Gerechtigkeitsauffassungen beschreiben: a) formal als Gesetzlichkeit oder Regelmäßigkeit, b) als Verteilungsgerechtigkeit (distributive Gerechtigkeit) und c) als ausgleichende, respek-

⁶⁴Etymologisch und ideengeschichtlich sind Gerechtigkeit und Rache eng verknüpft. Im Mythos der griechischen Antike etwa wird Gerechtigkeit hergestellt, in dem die Götter Rache nehmen an den Menschen für ihre Verfehlungen (vgl. Benjamin (1999)). Die Tradition, Gerechtigkeit auch im kritischen Blick autoritärer Willkür in der gewaltsamen Rechtsdurchsetzung zu betrachten, setzt sich bis heute fort. Nietzsche schreibt im Zarathustra, „gerecht“ klinge in der sog. Sklavenmoral immer wie „gerächt“ (Nietzsche, 1999, S. 122).

tive wiederherstellende oder korrektive Gerechtigkeit ((Mazouz, 2012, S. 366), dort allerdings in abweichender Reihenfolge).

Ad a. Politisch wird Gerechtigkeit bei Aristoteles in der Frage, welche Polisverfassung gerecht sei, in dem er verschiedenen Regierungsformen verschiedene Attribute zuweist und sie in ihren negativen und positiven Spielarten untersucht (Aristoteles, 1969, S. 95ff). Die Debatte um Monarchie, Aristokratie, Oligarchie und Tyrannis ist für uns irrelevant. Wir setzen die moderne Staatsform der rechtsstaatlich verfassten, parlamentarischen Demokratie voraus. Diese kann theoretisch eher minimalistisch oder anspruchsvoller konzipiert werden. Hieraus ergeben sich unterschiedliche Typen von Demokratietheorien. Minimalistisch sind systemtheoretische oder ökonomische Konzeptionen der Demokratie; anspruchsvoller sind republikanische oder deliberative Konzeptionen. Je anspruchsvoller die jeweils vertretene Konzeption von Demokratie, umso höher wird gleichsam die Messlatte für die politische Gerechtigkeit bei der Suche nach einer Lösung des Entsorgungproblems. Interessant ist, dass der Gesetzgeber sich selbst implizit auf ein anspruchsvolles Verständnis von Demokratie festgelegt hat (Transparenz, Diskurs, Konsens, Beteiligung), das in theoretischer Perspektive einer deliberativen Konzeption entspricht.

Prozedurale Gerechtigkeit im Verfahren ist der Kern der politischen Gerechtigkeit, da die Legitimität der verfassungsmäßigen Ordnung nicht zur Diskussion steht. Prozedurale Gerechtigkeitsnormen dienen der Beurteilung von rechtsstaatlichen Verfahren, Prozessqualität (Reversibilität, Lernfähigkeit) und der staatsbürgerlichen Teilhabe bzw. Mitwirkung an Entscheidungen. Diese Gerechtigkeitsnormen zielen damit auch auf die Beurteilung der Legitimität von Entscheidungen und Entscheidungsverfahren. Hier ist allerdings zu unterscheiden zwischen Gerechtigkeit und Legitimität, da nicht alle Fragen politischer Legitimität auch Fragen von ethischer (oder moralischer) Gerechtigkeit sind (Arendt, 1970). Die prozedurale Gerechtigkeit spaltet sich in die Kriterien „Rechtsstaatlichkeit“ und „Partizipation“ (zu diesem Verhältnis vgl. Smeddinck u. Roßegger (2013); Smeddinck (2014, 2017)), zwischen denen es durchaus Trade-Offs geben kann.

Die Kriterien der rechtsstaatlichen Legalität und der demokratischen Legitimität füllen nun das Postulat der Gerechtigkeit nicht aus. Diese Einsicht vermuten wir hinter den Versuchen, im Rahmen der Standortsuche zusätzlich zu hohen rechtsstaatlichen Standards und der Übertragung der Entscheidung über einen Endlagerstandort an das Parlament ein hohes Maß an Partizipation zu gewährleisten. Anstelle des traditionellen

Modells der hierarchischen Steuerung mit Rechtsschutzmöglichkeiten auf allen Instanzebenen hat sich der Gesetzgeber im Standortauswahlgesetz für ein Regulierungs- und Legitimationsmodell entschieden, dass mehrere Entscheidungen des Bundestages bei eingeschränktem Rechtsschutz Eingangsinstantz Bundesverwaltungsgericht) mit erweiterten Öffentlichkeitsbeteiligungselementen kombiniert (vgl. Smeddinck (2014); Smeddinck u. Semper (2016)). Man würde deshalb den Ehrgeiz des politischen Systems unterbieten, wenn man eine weniger anspruchsvolle Konzeption zugrunde legen würde. Dies betrifft nicht nur das Transversalprojekt, sondern ENTRIA als Ganzes (siehe Kapitel 4). In diesem Sinne ist die Grundentscheidung für eine Konzeption deliberativer Demokratie (hierzu Habermas (1992)) nicht nur demokratietheoretisch begründbar, sondern sie reflektiert den impliziten Ehrgeiz des politischen Systems selbst.

Ad b. Die austeilende oder distributive Gerechtigkeit ist die Gerechtigkeit hinsichtlich der Güterverteilung bzw. derjenigen Güter, die zur Verteilung anstehen. Güter können positiv („begehrt“) oder negativ („unerwünscht“) sein. Distributive Gerechtigkeitsnormen dienen als Beurteilungskriterien dafür, ob Lasten und Nutzen, d. h. negative und positive Güter nach bestimmten Prinzipien (Bedürfnis, Verdienst, Verursachung usw.) gerecht unter den verschiedenen Gerechtigkeitssubjekten und -akteuren verteilt werden.

Es geht in dieser Dimension also darum, dass ein Akteur (als Person oder Institution) Güter entsprechend gerechter Regeln verteilt, respektive empfängt. Diese lassen sich in materiale und prozedurale Ansätze unterteilen, wobei die prozedurale Gerechtigkeit in der Dimension distributiver Gerechtigkeit wieder virulent wird. Distributive Gerechtigkeit lässt sich Mazouz zufolge demnach in input (prozedural) und output (materiell) differenzieren. Dies ist insofern von Bedeutung, als demokratietheoretische Überlegungen zur Gerechtigkeit die prozedurale Fairness in der Verteilung von Nutzen und Lasten fokussieren und damit gleichzeitig den aristotelischen Begriff der politischen Gerechtigkeit im Begriff der Verfahrensgerechtigkeit aufgehen lassen. Die distributive Gerechtigkeit ist insofern von der politischen Fairness nicht unabhängig.

Die zeitgenössischen Theorien der Gerechtigkeit haben sich auf die Verteilung positiver Güter konzentriert. Auch in gegenwärtigen Theorien (idealer) globaler Gerechtigkeit steht die Verteilung positiver Güter im Vordergrund (etwa zur Armutsbekämpfung durch globale Transfers). Man kann aktuelle Theorien globaler distributiver Gerechtigkeit als Bemühungen deuten, Gründe zu geben, warum die globalen Ungleichheiten

an Einkommen, Vermögen, Chancen usw. auszugleichen seien (exemplarisch: Caney (2005)). Diese Theorien globaler Umverteilung erweisen sich bei näherer Prüfung als nicht problemadäquat hinsichtlich der Einlagerungsproblematik.

In unserem Fall betrifft die Verteilung ein negatives Gut, nämlich eine hoch toxische langlebige Altlast, von der niemand mehr profitieren kann. Es liegt in der Natur der Sache, dass die Verteilung negativer Güter immer dann, wenn das Kriterium „Verursachung“ nicht greift, als „ungerecht“ empfunden werden kann⁶⁵. Das Problem der „empfundenen“ Ungerechtigkeit vermittelt sich mit dem Problem der Emotionalität (s. u. Abschnitt 3.8.3).

Die ethische Reflexion auf die Verteilung negativer Güter (wie hoch radioaktive Reststoffe) betritt daher Neuland. Hinzukommt, dass die moralische Intuition, negative Güter seien möglichst gleich zu verteilen, aufgrund der Korrelativität des Kriteriums der Sicherheit (siehe Abschnitt 3.8.1) für unser Problem nicht ernsthaft in Frage kommt. Bei Lastenverteilung wäre intuitiv zunächst ein „burden-sharing“-Argument plausibel, d.h. eine gleichmäßige Verteilung der Lasten und Verantwortung auf möglichst viele Schultern und Orte⁶⁶.

Einer gleichmäßigen Verteilung der hoch radioaktiven Reststoffe (und einem Ortswechsel im Lauf der Zeit) steht allerdings das Sicherheitsprinzip entgegen: „concentrate and confine“, also die Maßgabe, die Stoffe an möglichst wenigen Orte konzentriert einzuschließen. Wir würden also nicht an 1.000 Standorten jeweils 30 m³ hoch radioaktive Reststoffe einlagern wollen. Das korrelative Prinzip der Sicherheit hebt also gleichsam die egalitaristische Intuition hinsichtlich der Verteilung negativer Güter aus. Zudem hat sich der Gesetzgeber in distributiver Hinsicht normativ dahingehend festgelegt, dass eine Verbringung ins Ausland ausscheidet. Eine ökonomische Lösung, die komparative Standortvorteile in Sibirien oder Australien geltend machen könnte, scheidet daher aus.

Unter diesen Prämissen lässt sich nun die Problemstruktur beschreiben: Dauerhafte Zuteilung eines negativen Gutes in komprimierter (konzentrierter) Form auf nationaler Skala in politischer Prozeduralität.

Setzt man - entgegen der Konzeption deliberativer Demokratie und im Sinne der Spieltheorie - angesichts dieser Problemstruktur nur strategi-

⁶⁵ Das Verursacherprinzip erweist sich bei unserem Problem als uneindeutig. So haben doch fast alle Haushalte in den vergangenen Jahrzehnten Atomstrom verbraucht und von (vermeintlich) günstigen Preisen profitiert.

⁶⁶ In der Sendung „Quarks und Co: Endlager verzweifelt gesucht“ (WDR 2010) schlägt der Moderator am Ende – nicht ohne Ironie – eine Endlagerung in kleinen Urnen vor, die von jedem Haushalt von Generation zu Generation vererbt werden. <https://www.youtube.com/watch?v=qyELezLKnEc> [03.03.2018].

sches Verhalten aller Akteure voraus, handelt es sich um ein „Schwarzer-Peter“-Spiel, aus dem alle Mitspieler ausscheiden möchten. Alle Spieler werden demnach eine NIMBY-Strategie wählen. Diese Doppelperspektive (deliberative Demokratie, Spieltheorie) kann zur Erklärung des Verhaltens vieler Akteure herangezogen werden. Es entsteht die paradoxe bzw. widersprüchliche Situation, dass der Diskurs (als Reflexionsform kommunikativen Handelns) allseits gefordert wird und strategisches Verhalten (und entsprechende Rhetorik) der beteiligten Akteure wahrscheinlich sind.

Ad c. Die kommutative oder ausgleichende Gerechtigkeit teilt sich in den freiwilligen und den unfreiwilligen Verkehr der Menschen untereinander. Im unfreiwilligen Verkehr der Straftaten ist die kommutative Gerechtigkeit die der Gerichtsbarkeit und der Strafverfolgung. Sie kompensiert erlittenes Unrecht durch juristische Vergeltung im Akt des Richtens. Hier stellen sich Fragen der „gerechten“ Strafe, was in unterschiedliche Straftheorien führt. Da es sich um die Allokation eines negativen („unerwünschten“) Gutes handelt, berühren sich sowohl prozedurale als auch distributive Gerechtigkeit mit Fragen einer (angemessenen) Kompensation, also mit Fragen kompensatorischer Gerechtigkeit, die als eine Unterform der kommutativen Gerechtigkeit aufgefasst werden kann. Die kompensatorische Gerechtigkeit wiederum weist eine intrinsische Logik hinsichtlich des Problems der Bereitwilligkeit auf (s. u. Abschnitt 3.8.4 und ausführlich Ott u. Riemann (2018)).

Wir können also im Ergebnis den Nachweis führen, dass alle drei aristotelischen Dimensionen der Gerechtigkeit (politisch, distributiv, kompensatorisch) bei der Problemlösung präsent sind. Sie sind allerdings nicht isoliert zu betrachten, sondern verschränken sich ineinander. Auch sie erweisen sich als korrelativ. Aus der Perspektive zeitgenössischer Gerechtigkeitstheorien lassen sich weitere Bestimmungen gewinnen.

John Rawls

So bindet beispielsweise John Rawls in der Überarbeitung seiner Gerechtigkeitstheorie „Gerechtigkeit als Fairness“ die einzelnen Differenzierungen des Gerechtigkeitsbegriffes an die Bedingungen einer gerechten Grundordnung. Für John Rawls ist Gerechtigkeit die oberste Tugend gesellschaftlicher Institutionen. Rawls kommt zu dem Ergebnis, dass sich die Entscheidenden auf Grundprinzipien von allgemeiner Gültigkeit einigen könnten: gleiche Grundfreiheiten (Freiheit), demokratische Chancengleichheit (Gleichheit) sowie das sog. Differenzprinzip (Brüder-

lichkeit bzw. Solidarität). Eine gerechte politische Grundordnung muss je ein Prinzip der Freiheit, der Chancengleichheit, der Solidarität und einer intergenerationellen Hinterlassenschaft beinhalten. Diese Prinzipien werden hinter einem sog. Schleier der Unwissenheit, d. h. in einer „original position“ gewählt (s. Seite 348ff). Sie müssen in spezifische Institutionen implementiert und auf Problemstellungen bezogen werden. An diesen Gerechtigkeitsprinzipien müssen sich - so der ideale Teil der Theorie - fortan alle weiteren Normen der Gesellschaftsordnung messen lassen und dürfen nicht im Widerspruch zu diesen stehen (Rawls, 2003). Die Gerechtigkeit einer Grundordnung erweist sich darin, ob die Prinzipien in der demokratischen Praxis konkreter politischer Gemeinwesen gleichsam „wiedererkennbar“ sind. Spezifische Probleme können nicht hinter dem Schleier der Unwissenheit gelöst werden. Für sie sind bei Rawls besondere politische Abteilungen („branches“) zuständig, die unseren Ministerien ähneln. Der Suche werden durch die ersten drei rawlsianischen Prinzipien nur allgemeine „constraints“ auferlegt: Jede Lösung muss Freiheitsrechte, Chancengleichheit und ein gutes soziales Minimum respektieren. Die Grundrechte, ein faires Bildungssystem und der Wohlfahrtsstaat scheinen durch die Suche nach einer Lösung des Entsorgungsproblems nicht direkt gefährdet.

Zu wenig beachtet wurde, dass Rawls auch das Prinzip einer fairen intergenerationellen Hinterlassenschaft („Sparplan“) begründet (§ 44 der „Theory of Justice“). Es wurde an anderer Stelle gezeigt (Ott, 2014), dass dieses intergenerationelle Prinzip in der bisherigen Rawls-Literatur nicht gebührend gewürdigt wurde. Dieses Problem erweist sich als problemrelevant, sobald man die Reststoffproblematik als Frage der Zukunftsverantwortung in den Blick nimmt (s. Abschnitt 3.8.4). Aus rawlsscher Sicht wird jede kollektive Hinterlassenschaft positive und negative Güter beinhalten, wobei die positiven Güter überwiegen sollten und die Belastungen durch negative Güter so gering wie möglich gehalten werden sollten. Das Kriterium, das bei Rawls bei der Wahl des Differenzprinzips herangezogen wurde (sog. Minimax-Prinzip: Minimiere den maximal möglichen Schaden), könnte einschlägig sein bei der Maxime der Belastungsreduktion. Nur unter einem Minimax-Kriterium höchstmöglicher Sicherheit kann das Thema der Freiwilligkeit überhaupt zur Sprache kommen (s. Abschnitt 5.3.1).

Aus umweltethischer Sicht wäre der Grundsatz zu bedenken, dass die Hinterlassenschaft an negativen Gütern nicht in einer Dimension kulminieren darf, in diesem Falle in der Dimension von Umwelt und Natur. Sofern wir zur Hinterlassenschaft hoch radioaktiver Reststoffe keine Alternative mehr haben, erscheint ein Argument plausibel, zukünftige Genera-

tionen nicht zusätzlich mit Klimawandel, Ozeanversauerung, Wasserverschmutzung, Bodendegradation, Artensterben, Solar Radiation Management zu belasten und die heutige Generation zu verpflichten, sich aktiv um anderweitigen Ausgleich für diese negativen Güter zu bemühen (durch Naturschutz, Renaturierung, Meeresschutz, Aufforstung etc.). Dieses Argument weist aber über ENTRIA hinaus in die Debatte um Zukunftsverantwortung im Anthropozän (Ott, 2016) und Nachhaltigkeit. Aus Sicht „starker“ Nachhaltigkeit (Ott u. Döring, 2004) und der sog. Bestände-Perspektive (Klauer u. a., 2013) lässt sich fordern, dass die Produktion negativer Umweltgüter durch anderweitige Investitionen in Naturkapitalien zu kompensieren ist.

Michael Walzer

Für Walzer (1998) bestehen diverse Sphären der Gerechtigkeit („Spheres of Justice“), die sich auf unterschiedliche Güter beziehen, deren Bedeutung kulturell bestimmt werden. Für Walzer sind Verteilungen jedenfalls nur gerecht oder ungerecht *sub specie* der Bedeutung eines zu verteilen- den Gutes.

In unserem Fall haben wir es, wie ausgeführt, mit einem extrem langlebigen negativen Gut zu tun, das aus Sicherheitsgründen nicht gleichmäßig verteilt werden kann, sondern konzentriert werden muss. Dieses negative Gut steht im kulturellen und geschichtlichen Horizont der Auseinandersetzung um die zivile Nutzung der Kernenergie bzw. des „Atomzeitalters“. Die Frage nach Gerechtigkeit ist daher durch diese kulturgeschichtliche Dimension „imprägniert“. Die Wahrnehmung (Perzeption) radioaktiver Reststoffe ist durch vergangene Leitbilder, Narrative und Konflikte geprägt. Die Kernenergie polarisierte. Das Verhältnis von Vertrauen und Misstrauen in Wissenschaftler und Behörden unterscheidet sich kulturell auch in benachbarten westlichen Demokratien: Vertrauen in Schweden versus Misstrauen in Deutschland. Der Kulturalismus muss dabei gerade auch historische Konflikte in Rechnung stellen. Diese Konflikte sind, wie auf vielen Veranstaltungen zu erleben war, auch bei dem Versuch eines neuen Suchprozesses noch virulent (vgl. z. B. Smeddinck (2016)). Allerdings können sich kulturelle Bedeutungen auch wandeln. Was früher in apokalyptischer Perspektive „Teufelszeug“ war, könnte auch mit Gründen entdramatisiert werden. Ob die nachwachsenden Generationen radioaktive Reststoffe eher dramatisieren oder eher normalisieren, hängt dabei, wie Walzer gegen Habermas konzedieren müsste, von realen Diskursen ab, die in der Gegenwart geführt werden müssen.

Ideale und nicht-ideale Gerechtigkeit

Die gerechtigkeitstheoretische Reflexion, die ENTRIA über fünf Jahre begleitet hat, zeigt, dass aus der Ethik zwar Orientierungspunkte gewonnen, aber keine Lösungen deduziert, d. h. abgeleitet werden können. Die Ethik gelangt eher zu der Einsicht, dass Forderungen nach idealer Gerechtigkeit und perfekter Sicherheit keinen Sinn machen. Wir bewegen uns im Gebiet nicht-idealer Lösungen in den beiden normativen Dimensionen von Sicherheit und Gerechtigkeit. Das Einlagerungsproblem ist ein Problem der nicht-idealen Theorie der Gerechtigkeit.

Das gesuchte Höchstmaß an Sicherheit ist keine ideale Sicherheit, bei der eine Belastung mit ionisierender Strahlung ausgeschlossen wäre. Auch bei dem Höchstmaß von Sicherheit stellen sich an bestimmten Punkte Fragen von Kosten und zusätzlichem Nutzen. Was wäre (im Gedankenexperiment), wenn ein Höchstmaß an technogener Sicherheit sich noch steigern ließe, wenn alle Behälter einen zusätzlichen Mantel aus Platin erhalten würden? Eine ideale Gerechtigkeit der Allokation negativer Güter ist bereits konzeptionell problematisch. Es geht eher um die Frage, wie gerecht in allen Dimensionen gerecht genug ist.

Fazit

Zusammenfassend ist festzustellen, dass wir der Entsorgungsstrategie gerechtigkeitstheoretisch einen dreidimensionalen (Aristoteles), einen prozedural-diskursiven bzw. deliberativen (Habermas), einen zukunftsethischen (Rawls) und einen kulturell-güterethischen (Walzer) Ansatz zuordnen können. Die drei ineinander verschränkten Dimensionen sind: prozedural, distributiv und kompensatorisch. Diskursivität besagt, dass „gute“ Lösungen nicht anders denn im Austausch von Gründen gefunden werden können. Diese Lösungen müssen mit den Prinzipien einer gerechten Grundordnung vereinbar sein. Die güterethische Konkretion steht im Horizont geschichtlicher Auseinandersetzungen. Wir können nun, da das Feld aufgespannt ist, alle Punkte vertiefend analysieren im Wissen darum, dass wir uns im Bereich nicht-idealer Lösungen bewegen.

3.8.3 Emotionen als Rationalität eigener Art

Im Hinblick auf die Realisierung eines Endlagers für Atommüll soll das Recht Sicherheit und Gerechtigkeit gewährleisten. Wenn man die Begriffe erweitert zu Sicherheitsgefühl und Gerechtigkeitsgefühl (Bandelow u. Thies (2014); eingehend zum Rechtsgefühl: Schützeichel (2016)) wird sofort deutlich, wieviel Gerechtigkeit, aber eben auch Sicherheit mit Emo-

tionen zu tun haben. „Vernunft und Gefühl lassen sich nicht trennen, Letzteres ist essentiell für das Funktionieren der Ersteren“ (Plamper, 2012, S. 349). Anders gewendet: „[...] jeder rationale Prozess ist eingebettet in emotionale Bewertung, jede Intuition ist getragen von Handlungsabsichten“ (so der Hirnforscher Ernst Pöppel, zitiert nach (Plamper, 2012, S. 288)).

Die Wahrnehmung unfruchtbarer und unterkomplexer Diskussionsmuster im Rahmen von öffentlichen Veranstaltungen im Zusammenhang mit der Standortauswahl, die – offenbar in Fortführung historischer Kontroversen (vgl. (Radkau u. Hahn, 2013, S. 307f)) eher holzschnittartig German Angst beklagten und von Andersdenkenden mehr Rationalität einforderten, veranlassten das Institut für Rechtswissenschaften an der TU Braunschweig das Thema „Emotionen bei der Realisierung eines Endlagers“ aufzugreifen. Dazu fand ein Werkstattgespräch statt und es wurde ein erweiterter Tagungsband mit interdisziplinären Beiträgen veröffentlicht (Smeddinck, 2018a).

Impulsgeber waren die Akzentuierung der Forschung zur Geschichte der Emotionen in der Geschichtswissenschaft (Plamper, 2012). Außerdem hatten erste interdisziplinäre Teams Lösungsmöglichkeiten für emotional aufgeladene Konflikte im Zusammenhang mit der Energiewende thematisiert (Renn u. a., 2014; Roßnagel u. a., 2014).

Von wissenschaftlicher Seite wird heute durchaus einsichtig festgehalten: „Die Entsorgung von radioaktiven Abfällen wirkt auf viele Menschen furchterregend und wird daher als riskant eingestuft“ (Marti, 2016, S. 37). Dementgegen ist die Realisierung eines Endlagers für Atom Müll in den vergangenen Jahrzehnten von Politik, Verwaltung, Experten und Unternehmen auf eine technokratische und hierarchische Art und Weise versucht worden. Der Versuch scheiterte. Gesellschaftliche Widerstände wurden unterschätzt. Ängste und Befürchtungen wurden abgewertet und verdrängt (vgl. (Michel, 2015, S. 19); (Weisker, 2005, S. 211ff)).

Vor dem Hintergrund haben im Rahmen von ENTRIA unterschiedliche Disziplinen das Thema wissenschaftlich untersucht. Es drängt sich die Frage auf, ob und inwieweit Emotionen überhaupt erst einen oder einen neuen veränderten Stellenwert im Diskurs um ein Endlager erhalten sollten. Es gilt aber auch zu zeigen, wo die Grenzen der Berücksichtigung von Emotionen liegen.

Der Historiker Götter (2018) betont in diesem Rahmen, dass die Auseinandersetzung um die Kernenergie immer auch eine emotionale war. Den Kritikern der Atomenergie allerdings wurde – so – von zwei Seiten eine besondere Emotionalität zugeschrieben: einerseits von den Befürwortern der Kernkraft, die so bestrebt waren, die Position ihrer Gegner als

unsachlich, was den Beigeschmack der Illegitimität haben sollte, abzuwerten. Auch wenn es immer wieder einzelne apokalyptisch anmutende Beiträge gab, so ist doch sichtbar, dass starke Emotionen in der Debatte über die Kernenergie in Biblis vor allem als ein Werkzeug zur Delegitimation der Kernenergiekritik aufscheinen, während tatsächliche emotionale Äußerungen seitens der Kritiker mehrheitlich in einem sehr begrenzten Rahmen blieben – sowohl was die Heftigkeit der emotionalen Äußerung als auch was deren Häufigkeit angeht. Andererseits nutzten Personen, die sich als Repräsentanten der Kritiker verstanden ebenfalls den Vorwurf zu großer Emotionalität und versuchten auf diese Weise, die Legitimität ihres eigenen Tuns zu untermauern: Das Beispiel des Enthusiasmus-Vorwurfs der Bibliser Opposition gegen den dortigen Bürgermeister deutete bereits an, dass auch die Gegenseite Emotionalität als diskreditierend darstellen konnte. Tatsächlich aber trennten die Befürworter und Kritiker der Kernenergie nicht ihre ‚Emotionalität‘ oder ‚Sachlichkeit‘, sondern die Frage, ob sie sich in der Lage sahen, den Betreibern der kerntechnischen Anlagen sowie den für Genehmigungen und Aufsicht zuständigen Behörden zu vertrauen – oder eben nicht. Dies zeigen beispielhaft Debatten um die Kernenergie im Biblis der 1970er Jahre.

Die Psychologen Thies u. a. (2018) resümieren psychologische Einflussfaktoren auf Protestbereitschaft und -verhalten. Einige dieser Faktoren wurden in der bisherigen Forschung verhältnismäßig ausführlich betrachtet (z. B. Identität und Emotion), lieferten dabei aber auch, obwohl als grundlegend erachtet, z. T. widersprüchliche Ergebnisse (z. B. Persönlichkeit). Andere Faktoren wiederum fanden bisher nur wenig Beachtung, könnten jedoch zur Erklärung von Protestverhalten einen wichtigen Beitrag liefern (z. B. Vertrauen oder machtdynamische Prozesse). Sie betonen die Wichtigkeit projekt- bzw. themenspezifischer Analysen, aber auch den Einbezug gesellschaftlicher Wandlungsprozesse (z. B. das Phänomen ‘not in my backyard’: kritisch dazu Kap. 5.2.6). Sie propagieren die Idee einer differenzierten Betrachtung von soziodemografischen, personalen und situationalen Aspekten zur Erklärung von Protestverhalten und akzentuieren die Relevanz der (subjektiv erlebten) Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern an Entscheidungsprozessen.

Trotz einer zunehmenden Thematisierung von Emotionen in Politik und Politikwissenschaft, bleibt deren Bedeutung für den vorderhand besonders emotionsgeladenen Konflikt um die Endlagerung radioaktiver Abfälle bislang eher unterbelichtet. Bornemann (2018) legt eine differenzierte Analyse der emotionalen Dimension dieses Konflikts vor, die einen wichtigen Beitrag zu seiner politischen Bearbeitung leisten kann. Er nimmt eine konzeptionelle Klärung der Bedeutung von Emotionen

in Umwelt- und Technikkonflikten sowie eine Präzisierung des Verhältnisses von Emotionen und Ansätzen der politischen Partizipation, die im Zusammenhang mit der Bearbeitung des Konflikts um die Endlagerung radioaktiver Abfälle immer wieder gefordert werden, vor. Dazu bestimmt er einige allgemeine Koordinaten einer politikwissenschaftlichen Emotionsanalytik. Eine Konfliktfeldanalyse unter Aufklärung und Beachtung von Emotionen hätte zu berücksichtigen: den Konfliktgegenstand (Um was dreht sich der Streit?), die Konfliktparteien (Wer ist am Streit beteiligt?), den Konfliktkontext (Wo findet der Streit statt?), den Konfliktmodus (Wie wird der Streit ausgetragen und beigelegt?) und die Konfliktodynamik (Wie verläuft der Konflikt?). Als Zwischenfazit hält er fest: Eine konfliktfeldanalytische Perspektive macht zunächst auf die vielfältigen „Orte“ aufmerksam, an denen sich Emotionen in Umwelt- und Technikkonflikten manifestieren können. Sie verweist darauf, dass Emotionen nicht nur eine mögliche Determinante der individuellen Wahrnehmung und Akzeptanz von Risiken (wie in der psychologischen Forschung) oder Motivatoren für Bewegungs- und Protestverhalten (wie in der Bewegungsforschung angenommen), sondern in vielfältiger Weise mit mehrdimensionalen Konfliktfeldern verwoben sind. Emotionen sind Voraussetzungen, Merkmale und Folgen von Konflikten. Eine umfassende und differenzierte Analyse der Bedeutung von Emotionen für bzw. in Konflikte(n) muss diese unterschiedlichen Dimensionen eines Konfliktfeldes in den Blick nehmen.

Weiter schlägt Bornemann (2018) einen analytischen Bezugsrahmen zur differenzierten Analyse von Umwelt- und Technikkonflikten und der Bedeutung von Emotionen in solchen Konflikten vor und konturiert die möglichen funktionalen und dysfunktionalen Beiträge von Emotionen in bzw. für politische Partizipationsverfahren. Schließlich formuliert er Überlegungen zum weiteren wissenschaftlichen und politischen Umgang mit Emotionen in der Standortauswahl.

Ausgehend von der Gemengelage aus Kernenergie, Atommüll, Recht und Emotionen, die in einschlägigen rechtswissenschaftlichen Publikationen bisher nur selten und wenn dann eher schemenhaft angesprochen worden ist, beleuchtet Smeddinck (2018b) den Stellenwert von Emotionen als Thema in Recht und Rechtswissenschaft generell. Die nach wie vor wirkungsmächtige Idee des rationalen Staates als Erklärungsmuster für nicht (nachhaltig) konfliktlösende Entscheidungen wird kontrastiert mit dem Wechsel der Leitbilder für die Konfliktregulierung in Rechtswissenschaft, Gesetzgebung und Rechtspraxis.

Der Verengung einer Konfliktlösung auf die Entscheidung über wenige Rechtsfragen bei Gericht wird die Ausweitung des Streitgegenstandes ent-

geengehalten. Teil dieser Entwicklung ist ein verändertes Verständnis von Rationalität (Hoffmann-Riem, 2006). Es gibt nicht nur eine uniforme Bedeutung von „rational“. Die verschiedenartigen Erscheinungsformen von Rationalität geben vielmehr Anlass, von einem „Netz der Rationalitäten“ auszugehen (Hahn, 2017). Was bisher als irrational abgewertet wurde, wird nun in anderer Weise gewürdigt: „Empörung, Protestbereitschaft, auch Wut sind respektable Leidenschaften, die den politischen Alltag seit ewigen Zeiten antreiben, aber sie müssen sich zivilisieren, ohne ihre Emotionalität einzubüßen“ (Nanz u. Leggewie, 2016). Weitergehend wird die Bedeutung von Affekten in den verschiedensten Lebensbereichen betont: Ausgehend von diesen Grundüberlegungen lässt sich festhalten, dass es Konflikttreiber gibt, für die sich Grundformen der Auseinandersetzung je nach Formalisierung und Klärung zur Lösungsfindung oder Konfliktentscheidung anbieten: Über Rechte wird als verbindlich durchsetzbare Rechtspositionen vor Gericht verhandelt und entschieden. Interessen als „geistige Anteilnahme und Aufmerksamkeit, Vorliebe und Neigung, Bestrebung und Absicht; dasjenige, woran jemandem sehr gelegen ist; was für jemanden oder etwas wichtig oder nützlich ist; Vorteil, Nutzen“ (Duden) können etwa in Mediationsverfahren ausbalanciert werden (Hehn u. Wagner, 2016). Emotionen im Sinne von „Affekten und Leidenschaften (Zorn, Mitleid, Furcht u. a. m. sowie deren Gegenteil), unbezwingbar durch Vernunft (Aristoteles, David Hume)“ (Plamper, 2012, S. 32) bedürfen der Klärung und Bearbeitung z. B. im Stuhlkreis. Alle Konflikttreiber können aber auch verdeckt oder offen in den anderen Bearbeitungsformaten eine Rolle spielen.

Das Bewusstsein für das Zusammenwirken der Faktoren und die Bedeutung der Auswahl des Konfliktbearbeitungsformates sind in den vergangenen Jahren gewachsen. Partizipation und Verfahren bieten als Grundformen Ausgestaltungsmöglichkeiten, um freieren und flexibleren Formen der Konfliktlösung einen Rahmen zu geben. Der (Verwaltungs-)Vollzug generell entfernt sich mit seiner Aufwertung des Diskurses von seinen hierarchischen Ursprüngen (Rossen-Stadtfeld, 2012, Rz. 22). Wenn das Gespräch zum Leitbild des Umgangs mit dem mündigen Bürger im demokratischen Verfassungsstaat wird (Fehling, 2012, Rz. 48), dann muss über die Gestaltung der Beteiligung gewährleistet werden, „dass die Phase der Interessenklärung und Bestimmung [...] möglichst produktiv genutzt werden kann, ohne dass die Notwendigkeit der Entscheidung außer Sicht gerät.“ (Rossen-Stadtfeld, 2012, Rz. 60). Ergebnisoffene und faire Formen der Öffentlichkeitsbeteiligung bahnen leichter gemeinsam getragenen Lösungen den Weg (Renn u. a., 2014).

Die Ausgestaltung des Standortauswahlgesetzes kann als besonders prägnantes Beispiel dieses Paradigmenwechsels gedeutet werden. Das Standortauswahlgesetz enthält durchaus fortschrittliche Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Emotionen. Darüber hinaus geht es um die Lösung des historischen Konflikts um die friedliche Nutzung der Kernenergie. Ferner spielen Emotionen im Sicherheitsmanagement des Endlager-Betriebs eine Rolle.

Empörungsgefühle und Haltungen sowie deren Ausdruck in Sprechakten oder Protesthandlungen nehmen im Bereich des Sozialen und Politischen eine besondere Stellung ein, weil sie als Kritikformen öffentlich geäußerte Formen normativer Stellungnahmen darstellen. Der negative Charakter der Empörung, die auf Verletzungen von normativen Erwartungen reagiert, ist häufig klarer identifizierbar und öffentlich sichtbar, als normative Zustimmungen oder Indifferenz. Die philosophische Analyse der Empörung von Reichold (2018) untersucht begrifflich und argumentationstheoretisch die normativ-rationalen Strukturen von Empörungshaltungen. Empörung wird als Reaktion auf empfundene Verletzungen von (häufig impliziten) Normen und normativen Erwartungen interpretiert. Empörung macht die jeweiligen Bezugsnormen der empörten Personen oder Gruppen explizit und erlaubt so eine Beschreibung unterschiedlicher normativer Standpunkte und Haltungen in Bezug auf gesellschaftliche Kontroversen. Die Explikation der normativen und begrifflichen Struktur der Empörung legt dann die Grundlage für eine Bewertung sowohl der Gegenstände der Empörung als auch der Empörungshaltungen und -äußerungen selbst. Reicholds philosophische Analyse der Empörung trägt dazu bei, normative Standpunkte und Kontroversen im Kontext gegenwärtiger politischer Debatten um die Endlagerung von Atommüll in öffentlichen Debatten zu identifizieren und normativ zu bewerten.

Zusammenfassend betrachtet macht es Sinn, Emotionen als Rationalität eigener Art einzuordnen und zu würdigen. Entsprechend überschrieb die Braunschweiger Zeitung ihren differenzierten und anschaulichen Bericht vom Werkstattgespräch mit der positiven, fortschrittlichen Konnotation „Bürger-Wut ist konstruktiv“ (Kaufmann, 2016). Zumindest ist die häufig vorgenommene Entgegensetzung von Emotionalität und Rationalität zugunsten einer differenzierteren Betrachtung aufzugeben. In der Philosophie und der Ethik wurde dies hinsichtlich der Untersuchung moralischer Gefühle (Schuld, Mitleid, Empörung) mehrfach getan. An die Stelle der Entgegensetzung wurde die Frage nach der Angemessenheit emotionaler Reaktionen auf bestimmte Vorkommnisse gerückt. Diese Einsicht konnte im Werkstattgespräch bestätigt und spezifiziert werden.

Die von ENTRIA vorgelegten Erkenntnisse zu Emotionen bei der Realisierung eines Endlagers sollen als wissenschaftliche Grundlage dazu beitragen, den Umgang mit Emotionen produktiv aufzulösen. Dies soll dazu dienen, dass die beteiligten Akteure ihre Kommunikation und Handlungsweisen auf zeitgemäße Art und Weise anpassen und darauf aufbauend formelle und informelle Formate der Öffentlichkeitsbeteiligung fortentwickeln. Der im Rahmen von ENTRIA als notwendig aufgezeigte reflexive Umgang mit Emotionen wird auch in der nunmehr anstehenden Phase der Standortauswahl von nicht zu unterschätzender Bedeutung sein.

Insbesondere das Konzept der Verknüpfung der Ansiedlung eines Endlagers mit Perspektiven der Regionalentwicklung und Kompensationen stößt - obwohl in Fachkreisen durchaus geschätzt - in der deutschen Gesellschaft teils auf heftige Abwehr. Beleg dafür sind Reaktionen und Aussagen zu den Geldzahlungen für unterschiedlichste regionale Zwecke aus dem sog. Asse-Fonds. Diese werden als Korruption und Blutgeld verunglimpft. Die einschlägige Regelung im StandAG ist bisher noch kaum gesehen und diskutiert worden: Konkret erhalten die Regionalkonferenzen u. a. Gelegenheit zur Stellungnahme bei der Erarbeitung der sozioökonomischen Potentialanalysen nach § 16 Abs. 1 S. 3 (§ 10 Abs. 4 S. 2). Der Vorhabenträger führt danach in den Standortregionen sozioökonomische Potentialanalysen durch. Auf Grundlage der nach § 16 Abs.1 ermittelten Ergebnisse hat der Vorhabenträger unter erneuter Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach den §§ 22 bis 24 (das sind naturwissenschaftlich geprägte Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien) günstige Standorte nach Absatz 3 zu ermitteln (§ 16 Abs. 2 S. 1). Wenn auch nachrangig gegenüber der Sicherheit, werden so die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Verhältnisse zur Geltung gebracht. Die Regionalkonferenzen erarbeiten ferner Konzepte zur Förderung der Regionalentwicklung und sind bei der letztendlichen Standortvereinbarung zu beteiligen (§ 10 Abs. 4 S. 3).

Provokanterweise werden Ansatz und Konzept unter dem Begriff der „Freiwilligkeit“ thematisiert und diskutiert. Damit wird die Bereitschaft bezeichnet ein Endlager in der eigenen Region hinzunehmen und die damit verbundenen Belastungen durch Geldzahlungen ausgleichen zu lassen. Reflexartig löst der aber die Kritik aus, dass es kein Vetorecht für mögliche Standortgemeinden gibt - mithin die Ansiedlung eines Endlagers auch nicht freiwillig akzeptiert sein könne (vgl. Smeddinck, 2018c, S. 84)). Derjenige der kein Endlager in seiner Nachbarschaft, seiner Region möchte, wird das Konzept der Freiwilligkeit, mindestens aber den Begriff, als zynisch empfinden. Ott u. Riemann (2018) schlagen stattdessen den Begriff der Bereitwilligkeit als angemessener und treffender vor.

3.8.4 Bereitwilligkeit in Recht und Ethik

Freiwilligkeit als Option

Zumeist wird realistischerweise davon ausgegangen, dass niemand negative Güter freiwillig annimmt. Diese Voraussetzung kann natürlich ihrerseits in Frage gestellt werden. Warum der Möglichkeit nach ausschließen, dass manche Akteure Gründe haben könnten, radioaktive Reststoffe freiwillig bzw. bereitwillig anzunehmen? Der Ausschluss dieser Möglichkeit könnte sich seinerseits ja kulturhistorisch erklärbaren Vorurteilen („biases“) verdanken (siehe Abschnitt zu Walzer, S. 244f). Im Verlauf von ENT-RIA wurde deutlich, dass Freiwilligkeit kein Anathema sein darf.

Das Reizwort „Freiwilligkeit“ und das damit bezeichnete Konzept im Zusammenhang mit der Realisierung eines Endlagers für hoch radioaktive Reststoffe wurden aus ethischer und rechtswissenschaftlicher Sicht eingeordnet. Dabei war von dem Befund auszugehen, dass viele Menschen die Freiwilligkeit, mit der Risiken bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle eingegangen werden, als gering empfinden. Ihre Möglichkeiten, auf die Formulierung von Sicherheitsstandards, die Standortauswahl für Entsorgungsanlagen oder die sicherheitsgerichtete Gestaltung solcher Anlagen Einfluss zu nehmen, sind begrenzt (Eckhardt u. Rippe, 2016, S. 9).

Was heute als „Konzept der Freiwilligkeit“ diskutiert wird, hat in Deutschland vor allem der AkEnd (Bundesamt für Strahlenschutz, 2002) in den Diskurs eingeführt. Die Idee dabei ist, die Suche nach einem Endlager mit der partizipativ gestalteten Konzeption und Umsetzung einer langfristigen Regionalentwicklung zu verbinden (Ipsen, 2006, S. 112). Hintergrund für diese neuartige Kombination ist die Überlegung, dass die Region, die sich aktiv bei der Suche nach einem Standort beteiligt und zu einem späteren Zeitraum eventuell Standort des Endlagers ist, eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe übernimmt. Dafür soll es eine Anerkennung, einen Ausgleich geben.

Freiwilligkeit in rechtlicher Perspektive

Freiheit ist eine fundamentale Kategorie im Recht. Von der Freiwilligkeit lässt sich das nicht in gleicher Weise sagen.

Das Recht wird vor allem als Einschränkung der Handlungsfreiheit wahrgenommen. Nicht minder bedeutsam ist aber die freiheitssichernde und Freiheiten eröffnende Funktion des Rechts. Gegen die Einschränkung seiner Grundrechte kann sich jeder zur Wehr setzen. Nach Art. 2

Abs. 2 S. 2 Grundgesetz (GG)⁶⁷ ist die Freiheit der Person unverletzlich. Die Verfassung gewährt Gewissens- und Bekenntnisfreiheit (Art. 4), freie Meinungsäußerung, Medienfreiheit, Kunst- und Wissenschaftsfreiheit (Art. 5), Versammlungs- und Vereinigungsfreiheit (Art. 8, 9) Freizügigkeit (Art. 11) und Berufsfreiheit (Art. 12). Freiheitsausübung des einen kann Nachteil und Duldungspflicht des anderen, also eine Einschränkung von dessen Freiheit bedeuten. Die Einschränkung willkürlicher Freiheitsausübung konstituiert Freiheit. „(...) Freiheit gegenüber Eingriffen Privater besteht, insoweit und nur insoweit, als das Gesetz solche Eingriffe verbietet“ (Murswiek, 1988, S. 987).

Freiwilligkeit wurde im Umweltrecht vor allem als mögliche Alternative zu rechtlichen Verpflichtungen thematisiert. Freiwilligkeitsmodelle erscheinen attraktiv, wo grundrechtlich geschützte Individualgüter nicht unmittelbar oder nur geringfügig berührt sind. Grundrechtliche Schutzpflichten verhindern, dass Sicherheitsstandards zugunsten freiwilliger Aktivitäten aufgegeben werden können (Erbguth u. Schlacke, 2016, § 4 Rz. 27ff). Wenn keine Sicherheitsmaßnahmen realisiert würden, wären hoch radioaktive Abfälle für Menschen sehr gefährlich. Die Strahlung neben einem Brennelement ist in Minuten lebensgefährlich, wenn es frisch aus dem Reaktorkern entnommen wurde. Deshalb kann Freiwilligkeit im Zusammenhang mit der Realisierung eines Endlagers nur ein Additiv zum Ordnungsrecht bedeuten, nicht aber eine Alternative.

Der Ausgleich mittels Kompensationen insbesondere durch Geld für Nachteile oder Leistungen ist in der Rechtsordnung – anknüpfend an die Werteordnung der europäischen Kultur (Schneider, 2002, Rz. 61) – ebenso üblich wie anerkannt (grundlegend: Voßkuhle, 1999, S. 9f). Der Grad der Freiwilligkeit, Belastungen einzugehen, variiert. Derjenige, der ungewollt einen Schaden erlitten hat, erhält Ersatz (§ 823 Abs. 1 Bürgerliches Gesetzbuch). Derjenige, dessen Eigentum enteignet wird, erhält eine Entschädigung (Art. 14 Abs. 3 GG). Subventionen oder Abgaben beeinflussen in positiver oder negativer Weise die Entscheidung für oder gegen ein gewünschtes Verhalten. Die Vertragsfreiheit eröffnet jedenfalls grundsätzlich die beliebige Kombination von Leistung und Gegenleistung. („Denn jedes Geschäft, jeder Handel, jeder Verkauf und jeder Kauf hat die freiwillige Zustimmung von Männern und Frauen zur Voraussetzung, die diese Bedeutungen kennen, ja die sie de facto selbst geschaffen haben“ (Walzer, 1998, S. 51f). Arbeitskraft wird gegen Lohn getauscht. Gemeinden sollen Geld erhalten, wenn sie Flüchtlinge aufnehmen. Aktuell wird im Umweltrecht über die Beendigung umweltrechtlicher Verbandsklagen gegen

⁶⁷Vom 23. Mai 1949 (BGBl. III Gliederungsnr. 100-1), zuletzt geändert durch G vom 13. Juli 2017; (BGBl. I S. 2347).

Entgelt gestritten (Rehbinder, 2015). Die Freiheit, etwas auszutauschen, scheint den Nutzen der Beteiligten zu mehren. Armut und wirtschaftliche Benachteiligung können Freiwilligkeit in alternativlosen Zwang verwandeln (Sandel, 2013, S. 113 u. 116).

Der Ausgleich mit Geld steht offenbar vor einer Neuausrichtung, jedenfalls was die Zahlung ohne rechtliche Verpflichtung betrifft. Bisher ist der Staat nur zur Gewährung einer Kompensation in solchen Konstellationen verpflichtet, in denen sich ein verfassungsrechtlich gebotener Härteaussgleich ausschließlich durch Einräumung einer Entschädigungsregelung realisieren lässt (Voßkuhle, 1999, S. 363). Im Zuge der Energiewende ist mit anderen akzeptanzfördernden Maßnahmen auch die Möglichkeit der finanziellen Kompensation betroffener Gebietskörperschaften durch die Übertragungsnetzbetreiber eingeführt worden. Das löste Grundsatzkritik aus, dass unter Verzicht auf jegliches bislang anerkanntes Entschädigungskriterium nun durch einfache Vereinbarungen ein entschädigungsgleicher Zahlungsstrom ausgelöst wird. Solche kontur- und ziellose Entschädigungszahlungen seien in hohem Maße bedenklich. Es würden grundsätzliche Fragen der Verteilungsgerechtigkeit aufgeworfen. Gegenüber dem bisherigen Rechtsrahmen des grundrechtlich verankerten Entschädigungsrechts bedeute dies eine grundlegende Abweichung (Lüdemann u. Große Gehling, 2016).

Politik, Gesetzgeber und Rechtswissenschaft befinden sich jedoch hinsichtlich der Realisierung von umstrittenen Infrastrukturvorhaben in einer Phase der Neuorientierung. Paradigmatisch stellt (Steinberg, 2011, S. 350) fest:

„Bei der Durchsetzung eines Vorhabens tragen häufig nicht dieselben Personen die Nachteile, die auch die Vorteile genießen. Die Entscheidung ist somit nicht – wie die Ökonomen sagen – paretooptimal. Es sollen deshalb über das Fachplanungsrecht vorgesehene Ausgleichsmaßnahmen hinaus Kompensationen geleistet werden können, die Gegenstand verbindlicher Auflagen oder öffentlich-rechtlicher Verträge werden können. So lassen sich etwa für die Bevölkerung im „Schadensgürtel“ eines Vorhabens finanzielle Leistungen denken, welche nicht nur die Vermögensnachteile ausgleichen, sondern auch nach Art eines Schmerzensgeldes eine Art Anerkennung und eine Genugtuung für eine Beeinträchtigung von Lebensqualität darstellen.“

Rechtstatsächlich lassen sich im Wesentlichen zunächst zwei Situationen als Anknüpfungspunkte für Kompensationen bei der Realisierung eines Endlagers unterscheiden: proaktiv, im Vorfeld der Realisierung eines Endlagers, um die Akzeptanz der Betroffenen zu gewinnen oder zu verbessern sowie nachträglich zum Ausgleich von Nachteilen durch eine bereits

realisierte Anlage (Ott u. Riemann, 2018). Die Zeiten, dass die Atomanlage selbst als vorteilhafte Kompensation für eine strukturschwache Region galt (wie in Gorleben) sind lange vorbei.

Ein aktuelles Beispiel für solche Kompensationen stellt das Gesetz über die „Stiftung Zukunftsfonds Asse“ dar. Nach Bestimmung über Zweck und Fördergebiet, Aufgaben in § 2 soll die regionale Landesentwicklung im Landkreis Wolfenbüttel – insbesondere im Bereich um die Schachtanlage Asse II – gefördert und damit dazu beigetragen werden, Belastungen durch die Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Schachtanlage Asse 2 auszugleichen. Die möglichen Förderzwecke sind denkbar weit gefächert: Förderung von Wohnen, Infrastruktur, Siedlungsentwicklung, Arbeit, Wirtschaft, Bildung, Kinder- und Jugendarbeit, Soziales, Gesundheit, Erneuerbare Energie, Umwelt, Klimaschutz, Mobilität, Freizeit, Tourismus, Kultur, Sport, Engagementförderung, Wissenschaft, Forschung (eingehend: Weisensee (2018)). Aber auch gegenüber diesem Beispiel wurde typische Grundsatzkritik geübt und die Förderung als „Ablasshandel“ und „Blutgeld“ abgelehnt („Wir lassen uns unseren Widerstand nicht abkaufen!“). Hier sieht man deutlich, dass die Option einer „Bereitwilligkeit mit Kompensation“ unter moralischen Druck gesetzt wird.

Wie verläuft der Weg von der bloßen Konzeption zur möglichen rechtlichen Verbindlichkeit, vom Diskurs zum rechtlichen Kriterium? Zunächst galt es festzustellen, dass Freiwilligkeit (bisher) kein Kriterium des Standortauswahlrechts war und ist. Die Gesetzgebungslehre hat bereits früh darauf hingewiesen, dass rationale, einleuchtende, konsensstiftende Elemente dafür sorgen sollen, dass Verhinderungspotential und Gegenaktivitäten gegenüber dem Normbefehl bzw. der staatlichen Steuerung nicht überwiegen sollen (Schneider, 2002, Rz. 55).

Die Regulierung der Freiwilligkeit als ein Beurteilungskriterium für die Auswahl eines Standortes für ein Endlager wäre ein Signal an die Bürgerschaft auf diesen „Appell“, sich freiwillig zu melden, zu reagieren. Offen bleibt: Wie wird die Freiwilligkeit ermittelt? Wer darf sie (verbindlich) kundgeben? Den Schwierigkeiten ließe sich begegnen, wenn Freiwilligkeit doch nur als Argumentations- und Klärungshilfe den öffentlichen Diskurs bereichert (Smeddinck, 2018c). Letztlich hat sich der Gesetzgeber nur zu einer eher schemenhaften Erwähnung in § 10 Abs. 4 S. 3 StandAG entschieden. Danach erarbeiten die Regionalkonferenzen Konzepte zur Förderung der Regionalentwicklung und sind bei der letztendlichen Standortvereinbarung zu beteiligen (eingehend: Abschnitt 3.8.4).

Aus instrumenteller Sicht ist die Zurichtung der konkreten Kompensationen keineswegs trivial. Eine Umfrage bei Teilnehmern einer Gemeindeversammlung in der Schweiz, ob sie dem Bau eines Tiefenlagers zustim-

men würden, zeigten sich je nach setting höchst unterschiedliche Ergebnisse: Zunächst stimmten 50,8 Prozent mit Ja und nannten als Gründe nationalen Stolz, Fairness, soziale Verpflichtung und die Aussicht auf Arbeitsplätze. Als jedem Bürger hypothetische 5.000 Franken Kompensation aus Steuermitteln angeboten wurden, sank die Zustimmung zu einem Endlager auf 24,6 Prozent. Ähnlich präzise Versuche sind später offenbar nicht mehr durchgeführt worden (zu internationalen Erfahrungen vgl. Josipovic (2018)). Das Beispiel illustriert die Grundeinsicht von Michael Walzer: „Geld ist kein neutrales Medium, sondern überwindet alle Grenzen und kann mit Prinzipien kollidieren“ (Walzer, 1998, S. 52f).

Es ist richtig, das Konzept der Freiwilligkeit in ENTRIA weiter zu diskutieren und nach seinem Stellenwert im Kreise anderer Beurteilungskriterien für die Standortauswahl zu fragen bzw. die derzeitige Ausgestaltung im StandAG zu hinterfragen. Aus rechtswissenschaftlicher Sicht ist eine Dogmatik von Kompensationen ohne Rechtsverletzung überhaupt erst zu entwickeln (Smeddinck, 2018c) Der / diejenige, der / die kein Endlager in seiner Nachbarschaft, seiner Region möchte, wird das Konzept der Freiwilligkeit, mindestens aber den Begriff, als zynisch empfinden. Der vorgeschlagene Wechsel zur „Bereitschaft“ bzw. „Bereitwilligkeit“ könnte den „Volkszorn“ mildern (Ott u. Riemann, 2018).

Unklare „Freiwilligkeit“ im StandAG 2017 und Chancen der Partizipation

Unter Freiwilligkeit wird konzeptionell die Idee thematisiert, dass ein Ort, eine Region nicht gezwungen wird ein Endlager aufzunehmen, sondern dass auch die Bereitschaft bestehen könnte, bereitwillig die Verantwortung anzunehmen. Eine solche Bereitschaft sollte anerkannt werden, indem mögliche Nachteile ausgeglichen werden, um eine gute Entwicklung der Region zu ermöglichen.

Die Endlagerkommission hat einen Vorschlag zur weiteren Ausgestaltung der Öffentlichkeitsbeteiligung vorgelegt, der auch eine langfristige Vereinbarung zur Stärkung der regionalen Potentiale vorsieht (zum weiteren Smeddinck (2018c)). Ausgangspunkt ihrer Überlegungen sind zwei wesentliche Bedingungen:

Zum einen muss eine überzeugende Kontrolle ausgeübt werden, dass Standortauswahl und Realisierung des Endlagers dem Konzept der „bestmöglichen Sicherheit“ entsprechen. Zum anderen muss die Region in der Lage sein, die Belastungen durch den Bau des Endlagers und den Transport der Behälter wirksam und dauerhaft auszugleichen. Einer negativen Kennzeichnung der Region muss auch mit der Entwicklung des Aus-

gleichskonzepts entgegengewirkt werden (Endlagerkommission, 2016, S. 46).

Die Endlagerkommission betont die Notwendigkeit eines individuell auf die etwaige Region zugeschnittenen Ausgleichskonzepts und die Langfristigkeit des Ausgleichs, um langfristige Entwicklungspotentiale sicherzustellen. Auf die Anliegen der aktuellen Bevölkerung wie auf Expertenwissen und Prognosen über zukünftige Entwicklungen wird außerdem Wert gelegt (Endlagerkommission, 2016, S. 46).

Im Anschluss an die Vorarbeiten des AKEnd sind die Überlegungen von der Endlagerkommission aufgegriffen worden. So sollen neue Gremien der Öffentlichkeitsbeteiligung (Überregionales Begleitgremium, Einrichtung von Regionalkonferenzen, Rat der Regionen) (Di Nucci, 2016, S. 138) diese Aufgabe übernehmen:

„Der Rat der Regionen (...) hat die Aufgabe, eine standortunabhängige Strategie zur Förderung der Regionalentwicklung grob zu skizzieren. Das BfE erarbeitet in Phase 2 im Rahmen der sozioökonomischen Potentialanalyse die Datengrundlagen, die auch für die Abwägung eingesetzt werden (...). Je weiter das Standortauswahlverfahren voranschreitet, desto konkreter werden die verbleibenden Regionalkonferenzen (...) sich mit der Frage auseinandersetzen, wie sie ihre individuelle Regionalentwicklung stärken können. Spätestens in Phase 3 steht daher die Frage im Fokus, welche Unterstützung die Region erhält, um die ausgearbeiteten Strategien langfristig realisieren zu können und wie diese Unterstützung verbindlich vereinbart werden kann“ (Endlagerkommission, 2016, S. 380).

Die Endlagerkommission betont, dass eine solche Vereinbarung die Rechtsschutzmöglichkeiten einer Region nicht beschneidet. Es wird also kein Veto-Recht eingeräumt, sondern die Anwohner und Betroffenen werden auf die Rechtsschutzmöglichkeiten verwiesen, die ihnen das StandAG einräumt. Dabei hebt die Kommission hervor, dass neben den Rechtsschutzmöglichkeiten in § 17 Abs. 4 und § 19 Abs. 2 im Kontext des Standortauswahl- und Genehmigungsverfahrens für Bürgerinnen und Bürger zahlreiche weitere Möglichkeiten für das Einlegen von Rechtsmitteln bestehen (etwa bei Betriebsplanzulassungen, wasserrechtlichen Erlaubnissen zu Erkundungen und Duldungsanordnungen zu Vorarbeiten an Grundstücken) (Endlagerkommission, 2016, S. 58). Vertragspartner sollten die Bundesrepublik Deutschland und die Gebietskörperschaft in der Region sein, in der der ausgewählte Standort liegt. Als mögliche Gegenstände einer solchen Vereinbarung werden genannt:

Die ausgestaltbaren Eckpunkte der Anlagen (z. B. Verkehrsanbindung, Oberflächenanlagen, Emissionsschutz, Rahmenbedingungen für den Einlagerungsprozess, Abfallkapazität)

- Langfristige Verpflichtungen in der Betriebs- und Nachbetriebsphase
- Generationenübergreifend wirksame Kompensationen, mit denen die Entwicklungspotentiale der Regionen gestärkt werden und mögliche negative Nebeneffekte des Endlagers ausgeglichen werden (Endlagerkommission, 2016, S. 381).

Bemerkenswert ist die Einbeziehung und Mitsprachemöglichkeit im Hinblick auf die Ausgestaltung der Anlage, deren Betrieb und Infrastruktur. Auffällig ist außerdem der generationenübergreifende Anspruch. Es werden weitere Möglichkeiten der aktiven Mitsprache und Mitentscheidung eröffnet, die den Abwehrreflex gegenüber einem Endlager womöglich vermindern können (Drögemüller, 2016, S. 202). Hervorzuheben sind auch die Hinweise der Endlagerkommission zu den Mitwirkungsmöglichkeiten in den Regionalkonferenzen, die die auch generell diskutierte Frage der Betroffenheit aufgreift.

Das Standortauswahlgesetz regelt in § 10, dass die Partizipation „im räumlichen Bereich des Vorhabens“ stattfinden soll. Die Kommission geht davon aus, dass die Abgrenzung gleichermaßen auf geologischen wie auch sozioökonomischen Gesichtspunkten beruhen muss. Die Regionalkonferenzen sollen die Perspektiven aller Menschen vertreten, die sich durch den Bau und Betrieb eines Endlagers am möglichen Standort betroffen sehen. Diese Betroffenheit kann über das Gebiet oberhalb der Gesteinsinformation weit hinausreichen. Auch Staatsgrenzen bilden keine Grenzen der Beteiligung (Endlagerkommission, 2016, S. 398).

Regionalkonferenzen als Ansatzpunkt

Die weiteren Maßgaben und Empfehlungen überraschen nicht, wenn man sich vergegenwärtigt, dass das Letztentscheidungsrecht beim Parlament verbleibt und es hier eben nicht um die Abgrenzung von Gruppen und Einwohnerschaft geht, die zu einem Veto berechtigt sein soll.

In der langfristigen Perspektive ist zu berücksichtigen, dass die Regionalkonferenz eine zentrale Rolle bei der Erarbeitung der Standortvereinbarung einnehmen kann, Vertragspartner aber nur hoheitlich definierte Gebietskörperschaften werden können. Als pragmatische Grundregel wird empfohlen, dass die kommunalen Gebietskörperschaften, deren Gebiet oberhalb des möglichen Bergwerks liegt, gemeinsam mit allen direkt angrenzenden kommunalen Gebietskörperschaften eine gemeinsame Region bilden. Je nach geographischen Besonderheiten ist diese Grundregel anzupassen (Endlagerkommission, 2016, S. 398).

Der Vorschlag der Endlagerkommission hat seinen Niederschlag in der Novellierung des StandAG im Jahre 2017 gefunden. Damit wächst die Relevanz des Konzeptes der Freiwilligkeit über eine bloße Argumentations- und Klärungshilfe im öffentlichen Diskurs (Smeddinck, 2018a) hinaus in eine verbindliche, mehr oder minder praktikable Regelung.

Konkret erhalten die Regionalkonferenzen u. a. Gelegenheit zur Stellungnahme bei der Erarbeitung der sozioökonomischen Potentialanalysen nach § 16 Abs. 1 S. 3 (§ 10 Abs. 4 S. 2). Der Vorhabenträger führt danach in den Standortregionen sozioökonomische Potentialanalysen durch. Auf Grundlage der nach § 16 Abs. 1 ermittelten Ergebnisse hat der Vorhabenträger unter erneuter Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach den §§ 22 bis 24 (das sind naturwissenschaftlich geprägte Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien) günstige Standorte nach Absatz 3 zu ermitteln (§ 16 Abs. 2 S. 1). Wenn auch nachrangig nach der Sicherheit, werden so die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Verhältnisse zur Geltung gebracht.

Die Regionalkonferenzen erarbeiten ferner Konzepte zur Förderung der Regionalentwicklung und sind bei der letztendlichen Standortvereinbarung zu beteiligen (§ 10 Abs. 4 S. 3).

Anders als in den Empfehlungen der (Endlagerkommission, 2016, S. 398) wurde die Aufgabe eine standortunabhängige Strategie zur Förderung der Regionalentwicklung grob zu skizzieren, im StandAG 2017 dem Rat der Regionen nicht ausdrücklich aufgegeben. Allgemeiner heißt es in § 11 Abs. 2: Die Fachkonferenz Rat der Regionen begleitet die Prozesse der Regionalkonferenzen aus überregionaler Sicht und leistet Hilfestellung beim Ausgleich widerstreitender Interessen der Standortregionen. Das schließt ein entsprechendes Engagement jedenfalls auch nicht aus. Dagegen ist den Regionalkonferenzen – wie von der Endlagerkommission empfohlen – explizit die Gelegenheit eröffnet, sich mit ihren spezifischen Verhältnissen vor Ort auseinanderzusetzen und darauf aufbauend Maßnahmen der Regionalentwicklung zu projektieren. Welche Unterstützung die Region erhält, bleibt – wie von der Endlagerkommission vorgesehen (Endlagerkommission, 2016, S. 398) – offen. Konkreter wird das StandAG allerdings, indem es eine Standortvereinbarung und die Beteiligung der verbleibenden Regionalkonferenz daran vorsieht. Die Gesetzesbegründung macht zu den angesprochenen Regelungen in § 10 Abs. 4 S. 2 und 3 keine näheren Angaben. Insofern wird für die praktische Umsetzung auch auf die Empfehlungen der Endlagerkommission und andere fachliche Vorarbeiten zurückzugreifen sein, soweit sie den gesetzlichen Vorgaben nicht zuwiderlaufen. Die gefundene Ausprägung beherzigt jedenfalls einige Punkte, die als Gelingenbedingungen auf Basis früherer

Erfahrungen formuliert werden: Mögliche Kompensationen sollten gemeinsam verhandelt werden (Brunnengräber u. Di Nucci, 2017, S. 149 m. w. N.). Es ist also ein gänzlich anders gelagerter Fall als bei Entschädigung nach Enteignung. – Hier ist ein rechtsverbindlicher Rahmen für den möglichen lokalen Nutzen vieler gesetzt worden, der dazu beitragen könnte, dass Kompensationen nicht als Bestechung erscheinen, wenn die Gemeinschaft als Ganzes profitiert (vgl. (Brunnengräber u. Di Nucci, 2017, S. 149)).

Unabhängig davon ist aber auch eine weitere Diskussion über das Konzept der Freiwilligkeit, das keinesfalls breit gesellschaftlich bekannt und akzeptiert ist, und eine gesetzliche Regelung wünschenswert. Auffällig ist, dass die derzeit geltende Regelung schlecht verstanden wird, obwohl das Konzept in den einschlägigen Kreisen bekannt ist (vgl. (Domasch u. Zschiesche, 2018, S. 104f)). So wird im Hinblick auf § 10 Abs. 4 StandAG, kritisiert, dass unklar bleibe, was mit Standortvereinbarung gemeint ist. Angeblich suggeriere der Begriff inhaltlich fehlgehend, dass über den letztendlichen Standort eine Vereinbarung getroffen werde. Die Standortentscheidung treffe aber der Bundestag (Domasch u. Zschiesche, 2018, S. 97f). Eine klarere, für Laien weniger missverständliche Formulierung im Gesetzestext ist erforderlich.

Gerechtigkeit und Kompensation

Wie eingangs bereits erwähnt, handelt es sich bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe um eine gesellschaftliche Altlast, ein negatives Gut, welches verteilt werden muss. Wir müssen also davon ausgehen, dass Reststoffe am Ende des Entsorgungsprozesses an wenigen Orten oder an genau einem Ort zusammengefasst werden. Diese Maßgabe schließt „burden sharing“ zugunsten von Sicherheit, Ökonomie und Implementierungsfähigkeit aus und legt damit eine Standortregion fest. Nicht von vornherein ausgeschlossen ist damit, dass (unter der Voraussetzung höchstmöglicher Sicherheit) ein Standort ausgewählt werden kann, an dem hierfür in der Bevölkerung Bereitwilligkeit vorherrscht bzw. überwiegt. Die folgenden Ausführungen stützen sich auf die Beiträge in Ott u. Smeddinck (2018). Aus philosophischer Sicht ist zunächst festzuhalten, dass die Freiwilligkeit von Entscheidungen stark an die (metaphysische) Idee des freien Willens gebunden ist (Ott u. Riemann, 2018, S. 55). Von dieser Idee muss man das Problem der Freiwilligkeit bei der Annahme eines negativen Gutes lösen. Es genügt die Annahme, dass wir Menschen transzendental genötigt sind, uns unter der regulativen Idee der Freiheit zu denken, da andernfalls moralische, rechtliche und ökonomische

Zuschreibungen grundlos wären. Daher ist es pragmatisch sinnvoll, für unsere Zwecke nachmetaphysisch von Bereitschaft zu sprechen. Jemand ist bereit, x zu tun, wenn er sich ungezwungen bereit erklärt, x zu tun.

Die Qualifikation der Ungezwungenheit ist im Kontext deliberativer Demokratie wesentlich. Sie schließt Fehlinformation, Drohungen, Erpressungsversuche, „postfaktische“ Inszenierungen u. dergl. aus. Der Sprechakt, in dem P sich bereit erklärt x zu tun (zu übernehmen, durchzuführen, zu wagen usw.) sollte idealiter auf unverzerrter Deliberation beruhen.

Weitergehend lassen sich, was für unser Problem stark relevant, verschiedene Grade von ungezwungener Bereitwilligkeit unterscheiden: unbedingt, bedingt, abwägend, gekauft. Unbedingte Bereitschaft bezeichnen wir als „starke“ Bereitschaft, d. h. als Opfer ohne materielle Gegenleistung. Bedingte Bereitschaft bezeichnen wir als „schwache“ Bereitschaft. Es ist nicht unstatthaft, Bereitschaft an bestimmte Bedingungen zu knüpfen. Diese Bedingungen können Kompensationsforderungen beinhalten. Ungezwungene Bereitwilligkeit kann somit aus Verhandlungen über angemessene Kompensationsangeboten resultieren.

Die bereitwillige Übernahme eines negativen Gutes ist, nach Kantischer Begrifflichkeit, entweder verdienstvoll („meritorisch“) oder übergebührlisch („supererogatorisch“). Wir loben meritorisches und supererogatorisches Verhalten, aber wir machen niemandem moralische Vorwürfe, der solches Verhalten unterlässt. Wir können starke Bereitwilligkeit (Opfer) als übergebührlisches Verhalten einstufen, aber selbst schwache Bereitwilligkeit könnte, obschon an Bedingungen geknüpft, noch in die Kategorie meritorischen Verhaltens fallen.

Meritorisches Verhalten kann nicht verwerflich sein. Demnach wäre es gerade auch in ethischer Betrachtung völlig legitim, der bereitwilligen Übernahme von Standortverantwortung nur dann zuzustimmen, wenn diese mit – im Vorfeld ausgehandelten – Ausgleichsleistungen verknüpft ist und dem Verantwortungssubjekt einen gewissen Vorteil durch das Endlager bereitet. Ethisch problematisch hierin ist jedoch, dass sich der Fokus eines Ideals der Freiwilligkeit hin zu einer Legitimierung eigennütziger Berechnung verschiebt und damit die nicht-idealen Bedingungen des Handlungskontextes unterstrichen werden. Bedingte Bereitschaft wäre meritorisches und eigennütziges Verhalten zugleich. Ist dies überhaupt möglich? Ja. Ein Verhalten, das hinsichtlich seiner Intention eigennützig ist („Was gebt ihr mir dafür?“), kann hinsichtlich seiner politischen Konsequenzen (einvernehmliche Standortentscheidung) meritorisch sein.

Die Verhandlungen über Kompensate setzen wiederum Standards prozeduraler Fairness voraus. Die mögliche Bereitwilligkeit ist nicht als bedingungslos anzunehmen und diese Annahme bildet die konzeptionelle

Brücke zum Folgeproblem der Kompensation als Element oder Medium distributiver Gerechtigkeit. Distributive, prozedurale und kompensatorische Gerechtigkeit vermitteln sich in möglichen Verhandlungen über bedingte Bereitschaft. Diese Vermittlung macht eine solche Lösung aus ethischer Sicht nicht unattraktiv. „Volenti non fiat iniuriam.“

Die Betrachtung von Kompensationen als Medium distributiver qua kompensatorischer Gerechtigkeit eröffnet Raum für weitere Fragen und Differenzierungen. Im Kern sind das die Wer-, die Wofür- und die Wie-Frage:

Wer: Das Wer muss eingegrenzt werden und jede Eingrenzung ist willkürlich, da sie sich an historischen Gemarkungsgrenzen orientiert: Gemeinde, Landkreis, Bundesland. Wenn der Standort am Rande eines Landkreises liegt und die Kompensation nur an Einwohner dieses Landkreises geht, finden die Einwohner des benachbarten Kreises das womöglich „ungerecht“. Wird ein Radius gezogen, finden das die Anrainer der Hauptdurchgangsstraße „ungerecht“ usw. Die verhandelten Kompensate werfen also sofort ein internes Problem distributiver Gerechtigkeit auf, über das sich die Empfänger des Kompensats streiten könnten. Konsensfähig scheint nur die Annahme, dass die Gemeindeebene zu klein ist. Im Folgenden sprechen wir bewusst vage von „Standortregion“⁶⁸.

Wofür: Gefahr der Exposition mit radioaktiver Strahlung, Belästigung, Ärger, Unfrieden, Risikoübernahme, Konflikt, Wertminderung von Immobilien usw. Haben die Betroffenen wirklich Angst vor atomarer „Verseuchung“ oder eher vor dem Ende von „Ruhe und Frieden“? Gerade in ländlichen Regionen zählt das eher beschauliche, gemächliche, gutnachbarschaftliche, konfliktarme Alltagsleben mit zu dem, was die Lebensqualität ausmacht. Damit wäre es dann in einer Standortgemeinde vorbei: interner Zwist, Medienaufmerksamkeit, Protestaktionen, Polizeipräsenz, Vertrauensschwund usw. Standort ist Stress. Ein Leben über Jahrzehnte an einer hoch politisierten Großbaustelle zu verbringen, dürfte nur denen Vergnügen bereiten, die eine hohe politische Streitlust haben. Das dürfte im ländlichen Raum eher wenige sein. Wenn dem so wäre, müssen die Kompensationsforderungen sich aber auf die Qualitäten des gelebten Lebens beziehen, die verloren zu gehen drohen.

⁶⁸Wir möchten nur darauf hinweisen, dass die Gruppen von Anspruchsberechtigten bei prozeduraler, distributiver und kompensatorischer Gerechtigkeit immer eingegrenzt werden müssen. Aus konkreten Abgrenzungen (Stichtage, Numerus Clausus, Altersgrenzen) werden häufig wieder neue Fragen der Gerechtigkeit generiert.

Wie: Welche Arte von Kompensaten kommen überhaupt in Betracht: Rein symbolische Gratifikationen, d.h. Ehrungen (etwa durch Orden) schließen wir aus, da sie eher der starken Bereitschaft zugehören. Symbolische Kompensate werden von Obrigkeiten gestiftet und sind in der Regel nicht Gegenstand von Verhandlungen. Das Verdienstkreuz wird verliehen, nicht verhandelt. Der säkulare demokratische Staat sollte von seinen Bürgerinnen und Bürgern keine Opferleistungen erwarten müssen. Meritorisches Verhalten ist gleichsam Opfer genug. Empirisch betrachtet, ist es extrem unwahrscheinlich, dass starke Bereitwilligkeit an einem Ort dominiert, der ein Höchstmaß an Sicherheit gewährt. Also bleiben im Falle schwacher, d.h. bedingter Bereitschaft Geld, materielle Güter, Entlastungen, Vergünstigungen, Vorteile usw. übrig. Alle Vorteile bzw. Kompensate lassen sich im Prinzip monetarisieren.

In der ökonomischen Theorie der Kompensation gibt es Unter- versus Überkompensation. In diesem Fall meritorischen Handelns wäre eine (leichte) Asymmetrie zugunsten von Überkompensation gerechtfertigt. Kompensationen können einmalig, gestaffelt, kontinuierlich, degressiv usw. geleistet werden. Einmalige Leistungen sind angesichts der Zeithorizonte nicht sachgerecht. Attraktiv könnten langfristig angelegte Fonds-Lösungen sein: Die Zinsen aus einem Fonds werden auf unbestimmte Zeit jährlich an Region, Gemeinden oder Einzelpersonen ausgezahlt. Dadurch könnten im Laufe der Zeit unterschiedliche Projekte realisiert werden, was dem Wertewandel Rechnung trüge. Es würde also im Falle von Bereitwilligkeit ein Fonds eingerichtet, dessen Kapital „H+x“ betrüge. Das Kapital wird mündelsicher angelegt und der Staat leistet zudem eine Ausfallbürgschaft. Die Zinsen des Fonds fließen der Standortregion kontinuierlich zu. Letztlich sollen die Betroffenen authentisch und demokratisch über die Verwendung entscheiden dürfen, gleichwohl sei folgende Überlegung gestattet:

Modelle klassischer Kompensationen bei AKW-Standorten orientierten sich an dem Wohlstandsmodell der frühen Bundesrepublik: Infrastruktur, Bildungsbau, Turnhalle, BAB-Zubringer etc. Unsere empirische Hypothese lautet, dass dieses klassische Modell, wenn überhaupt, dann nur noch in peripheren Räumen wirklich attraktiv ist. Die Infrastrukturen sind derart ausgebaut, dass der Grenznutzen dieser Angebote sinkt. Vermutlich bestünde eine steigende Attraktivität von sog. postmaterialistischen Angeboten wie etwa:

- Reduktion der Lebensarbeitszeit: In der Standortregion beträgt das Renteneintrittsalter x Jahre weniger, die Regelarbeitszeit beträgt 39 Stunden minus x . Frühverrentung und/oder Viertagewoche. Die geldwerten Vorteile dieser Regelungen lassen sich leicht errechnen.

- Urlaub/Freizeit: Aus dem Fonds wird an jeden Haushalt jährlich ein bestimmter Betrag ausgezahlt, um Urlaubs- und Freizeitaktivitäten zu fördern. Familien mit Kindern werden besonders begünstigt.
- Bildung: Am Standort wird eine staatliche Hochschule eingerichtet. Die Anwohner dürfen über Schwerpunkte entscheiden: Kunstgeschichte, Sinologie, Philosophie, Literaturkunde, Umweltwissenschaften, Astronomie, Reaktortechnik usw.
- Naturschutz, ökologische Landnutzung: der Standortregion wird ein mustergültiges Biosphärenreservat eingerichtet, das umfassend subventioniert wird. Ökologischer Land- und Gartenbau, „sanfte“ Forstwirtschaft, Renaturierung, ÖPNV-Ausbau usw.
- Gemeinschaftsprojekte nach den Wünschen der Anwohner/innen: Gesundheitszentren, Bibliotheken, Wellness-Oasen usw.
- Ästhetik: Die baulichen Strukturen an der Oberfläche werden architektonisch gestaltet. Das Motto des Architektenwettbewerbs lautet: „Realsymbolisches Monument des Endes des Atomzeitalters“. Das Monument (Mausoleum) könnte im 22. Jahrhundert zur Touristenattraktion werden.

Derartige postmaterialistische („sozialökologische“) Angebote haben allerdings das Potential, atom-kritische Gruppen zu spalten. Manche Gegnerinnen und Gegner könnten die Angebote sogar „verlockend“ finden – und genau dies als besonders perfide wahrnehmen. Ein Weltzustand, in dem an der Oberfläche sozialökologische Ziele verfolgt werden, während unter der Erde große Mengen hoch radioaktiver Abfälle lagern, die einer vergangenen Epoche entstammen, erscheint zwar paradox, wäre nicht per se kontraintuitiv oder inkonsistent (Ott u. Riemann, 2018).

Bereitwillig sein können nur die Lebenden. Bereitwilligkeit ist notwendig paternalistisch gegenüber zukünftigen Generationen. Wäre es prinzipiell unfair hinsichtlich der Langzeitverantwortung, das Standortproblem durch verhandelte Bereitwilligkeit zu lösen, wodurch die nähere Zukunft begünstigt und die ferne Zukunft vor vollendete Tatsachen gestellt wird? Die Frage kann nur dann verneint werden, wenn Bereitwilligkeit nicht auf Kosten des korrelativen Postulats höchstmöglicher Sicherheit geht. Wie also können Kompensationsgerechtigkeit mit Zukunftsgerechtigkeit vermittelt werden?

Eine weitere Ebene distributiver Gerechtigkeit zeigt sich in der Verteilung von Lasten gegenüber zukünftigen Generationen, die im nächsten Abschnitt behandelt wird.

3.8.5 Gerechtigkeit zwischen den Generationen

Im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Endlagerkommission, 2016) wurde die „Vermeidung unzumutbarer Belastungen für zukünftige Generationen“ als ein zentrales Schutzziel bei der Lagerung und Entsorgung ausgewiesen und gleichzeitig mit der Nachsorgefreiheit und der Wahrung des Verursacherprinzips kontextualisiert (S. 140/1). In aller Regel liegt den Betrachtungen der intergenerationalen Gerechtigkeit bei der Entsorgung ein vager, unspezifischer Generationenbegriff zugrunde, der lediglich auf die grundlegende Problematik der lang andauernden Schädlichkeit der zu entsorgenden Stoffe verweist. Der Kommissionsbericht etwa formuliert ein Recht künftiger Generationen auf Langzeitsicherheit (Endlagerkommission, 2016, S. 61), ohne den Begriff der Generation und der Zeithorizonte zu spezifizieren. Das StandAG legt einen Zeithorizont von einer Million Jahre zugrunde und lässt damit darauf schließen, dass alle Generationen in diesem Zeitraum gemeint sind. Das Problem der Zukunftsverantwortung wird zumeist so konzipiert, dass derartig lange Zeiträume nicht überblickt werden können und damit „eigentlich“ keine verantwortliche Entscheidung möglich ist (so etwa Gärditz (2013)).

So scheiterte auch der Versuch, Generationengerechtigkeit im GG zu verankern (BT-Drs.16/3399) jedenfalls vorerst. Eine staatliche Zukunftsverantwortung findet sich aber auf nationaler Ebene in abgeschwächter Form statuiert. Der Schutz der natürlichen Lebensgrundlage auch für künftige Generationen gemäß Art. 20aGG ist Staatsaufgabe. Danach sind die Interessen jener zu schützen, die temporal noch nicht Mitglieder des Legitimationssubjekts sind (Gärditz, 2016). So muss zum einen gewährleistet sein, dass gegenwärtig Lebende Entscheidungen mit Langzeitwirkung treffen können. Zum anderen muss darauf geachtet werden, dass den zukünftigen Generationen kein gravierender Schaden angetan wird, der nach heutigem Recht verboten ist (Hofmann, 1981). Man ersieht hieraus die Unzulänglichkeit abstrakter Grundsätze, formaler Konzepte und dilatorischer Formeln bei der Lösung spezifischer Probleme. Die Rufe nach Diskurs und Zukunftsverantwortung, die Betonung verbesserter Verfahren und die Forderung nach mehr Partizipation sind alle berechtigt, beantworten aber weder einzeln noch zusammen die Frage „Wohin damit?“ (Ott u. Semper, 2017).

Neu angesetzt lässt sich die Grundannahme intergenerationaler Theorie folgendermaßen fassen: Da Menschen, die noch nicht leben, moral patients sein werden, sind wir als moral agents ihnen gegenüber zu moralischem Handeln verpflichtet. Das heißt, wenn eine Handlung, die wir heute begehen, Auswirkungen auf das Leben jener hat, welche künftig leben

werden, muss sie sich ebenso moralischer Betrachtung unterziehen wie eine andere Handlung. Sehr allgemein gesprochen, überführen wir durch unsere Handlungen heutige Möglichkeiten in zukünftige Wirklichkeiten. Die Produktion radioaktiver Reststoffe ist eine solche „modale Transformation“.

Grundsätzlich handelt es sich bei Überlegungen zu intergenerationaler Gerechtigkeit im Fernfeld um eine Erweiterung des normativen Raumes um hypothetische, respektive prospektive ethische Subjekte, die hinsichtlich ihrer Individualität prinzipiell unbestimmbar sind. Während sich die meisten Theorien der Gerechtigkeit in Gleichzeitigkeit bewegen, und auch die meisten Aspekte ihrer (nicht-)Verwirklichung im Raum der Intersubjektivität bestehen, ist die Erweiterung der Gerechtigkeitssubjekte um die Ungeborenen aus diskursethischer Sicht eine advokatorische Erweiterung der Diskursgemeinschaft. Die Vertretung und der Einbezug ihrer Interessen ist spekulativer, hypothetischer Natur und damit - ähnlich einer Modellierung - Extrapolation gegebener Ansprüche auf eine mögliche künftige Wirklichkeit. Das Prinzip der Zukunftsverantwortung ist so abstrakt, dass sich alle drei ENTRIA-Optionen unter Berufung auf dieses Prinzip rechtfertigen lassen. Differenzierungen sind also vonnöten.

Grundsätzlich lassen sich verschiedene Konzepte intergenerationaler Gerechtigkeit identifizieren und voneinander unterscheiden (Jonas, 1979; Birnbacher, 1988; Unnerstall, 1999; Ott, 2005). Hierzu gibt es (über)reichlich Literatur und es soll an dieser Stelle keine ausführliche Diskussion der möglichen Positionen vorgenommen werden.

Manemann (2015) etwa verweist mit Blick auf geologische Tiefenlagerung auf die mehr oder minder wahrscheinliche Diskrepanz zwischen Zukunftsmöglichkeit und Zukunftswirklichkeit und damit auf die Grenzen eines ethischen Handelns gegenüber künftigen Generationen. Unter welchen Bedingungen also, unter Zuhilfenahme welcher Theoreme lässt sich intergenerationale Gerechtigkeit überhaupt begründen und einfordern? Wir können natürlich mit Jonas darauf verweisen, dass wir eine gewisse apodiktische Pflicht haben, die Möglichkeit des Fortbestehens „echten“ menschlichen Lebens auf der Erde nicht zu gefährden und damit einen Handlungsimperativ formulieren: „Handle so, daß die Wirkungen deiner Handlung verträglich sind mit der Permanenz echten menschlichen Lebens auf Erden“ (Jonas, 1979, S. 36). Dieser Handlungsimperativ schafft eine starke Verantwortlichkeit für die Unversehrtheit künftiger Generationen und verbietet wenigstens die nachhaltige Zerstörung von Lebensräumen. Er mahnt uns heute Lebende entsprechend zur Sorgfalt im Umgang mit Stoffen, die eben diese Möglichkeit wenigstens einschränken können.

Der Imperativ von Jonas bedarf jedoch für spezifische Probleme der Ergänzung durch Kriterien; als solcher ist er zu abstrakt und hinsichtlich des Ausdrucks „Permanenz echten menschlichen Lebens“ zu vage.

Jörg Tremmel bietet eine präskriptive wie kontraktualistische Bestimmung der Generationengerechtigkeit: „Generationengerechtigkeit ist erreicht, wenn die Chancen der Angehörigen der nächsten Generation, sich ihre Bedürfnisse erfüllen zu können, im Durchschnitt besser sind als die der Angehörigen ihrer Vorgänger-Generation“ (Tremmel, 2012, S. 290). Dies impliziert einen sog. komparativen Standard der Zukunftsverantwortung: Es soll einer zukünftigen durchschnittlichen Person P eines Kollektiv K insgesamt nicht schlechter gehen als einer heutigen durchschnittlichen Person. Dieser komparative Standard impliziert für die Suche nach einer Lösung der Entsorgungsfrage kaum etwas. Das gleiche gilt für Forderungen der Art, dass alle lebenden und zukünftigen Menschen ein Anrecht auf ein gutes Leben haben, ihre Bedürfnisse befriedigen und ihre menschlichen Fähigkeiten entwickeln können sollen usw. Bei Sichtung der zukunftsethischen Literatur wurde (überraschenderweise) deutlich, wie wenig hilfreich diese für die konkrete Problembearbeitung ist. Die thematisch einschlägige ältere Literatur behandelt die Frage, ob solche Stoffe überhaupt erzeugt werden dürfen.

Wenn nun jedoch in einer starken Lesart der Generationengerechtigkeit der Anspruch erhoben wird, (möglichst) keine Lasten oder Schulden zu hinterlassen, so kann diese Norm im Kontext der Entsorgung radioaktiver Reststoffe nurmehr als verletzt und nicht herstellbar bezeichnet werden. In Anbetracht der auslaufenden Nutzung der Kernenergie und der nicht innerhalb der Nutzergeneration abschließbaren Entsorgung lässt sich konstatieren, dass eine wirklich generationengerechte Lösung nicht mehr gefunden werden kann – das sprichwörtliche Kind also in den Brunnen gefallen ist: „Die (End)Lagerung hoch radioaktiver Abfälle ist somit zukünftigen Generationen gegenüber *prima facie* moralisch nicht vertretbar“ (Buschka, 2009, S. 98).

Diese These impliziert, dass diese Stoffe nie hätten erzeugt werden dürfen. Unter der Prämisse der Existenz dieser Stoffe ist die These dilemmatisch: Wir müssen x tun, obwohl wir x nicht tun dürfen. Alles, was wir tun können, ist im Grunde falsch. Oder sie erhebt den Geltungsanspruch, die Lagerung müsse dauerhaft an der Oberfläche erfolgen. Oder sie lässt in der Formel des „*prima facie*“ ein Schlupfloch aus einem echten Dilemma. In der ethischen Literatur zu Dilemmata wird klar, dass Handeln im Dilemma den großen Vorteil hat, dass man sich nicht schuldig fühlen muss, wenn alle Handlungsoptionen einschließlich der Unterlassungen gleich schlecht sind. Situationen, in denen man sich unter dem Prinzip

der Übelminimierung um graduell bessere oder schlechtere Lösungen bemüht, sind *stricto sensu* keine Dilemmata. Aus dem Umstand, dass es keine ideale Lösung geben können wird, folgt nicht, dass wir bei der Suche nach einer Lösung der Entsorgungsfrage in einem Dilemma stecken.

In einer Generationenfolge lässt sich das Problem folgendermaßen beschreiben: Generation G-1 entscheidet sich für eine Technologie T, die als unerwünschte Nebenwirkung toxische Abfälle A generiert. T war in G-1 umstritten, wurde aber eingesetzt und A fiel an. G-2 sieht T überwiegend kritisch. Es wären vielen Vertretern von G-2 lieber gewesen, A wäre nie erzeugt worden. G-2 kann die von G-1 vorgenommene modale Transformation nicht ungeschehen machen. G-1 ist praktisch abgetreten und G-2 sieht sich gegenüber G-3, G-4....G-n in der Verantwortung, eine möglichst gute Lösung der Verbringung von A zu finden. Dabei müssen G-3 und G-4 mit einbezogen werden.

Wir können nichts ungeschehen machen und können uns um Übelminimierung bemühen. Aber mehr als das kann man von G-2 auch nicht erwarten. Aus diesem Grunde kann es als sinnvoll betrachtet werden, von Fairness bei der Übelminimierung zwischen den Generationen zu sprechen, welche wiederum Kriterien nach sich ziehen wie etwa Sicherheit, Minimax-Strategie, Transparenz, Nachvollziehbarkeit, finanzielle Vorsorge, Wissenserhalt und -weitergabe, Reversibilität, Befähigung, künftig eigenständige Entscheidungen über eine weiterzuverfolgende Entsorgungsstrategie treffen zu können. In der Liste der Kriterien ist das Kriterium der Reversibilität das Schlüsselkriterium. Es bedarf einer gründlichen Reflexion (s. u.). Dies ist jedenfalls dann zutreffend, wenn wir die Norm der Freiheit und Selbstbestimmung anlegen und prinzipiell von einem Mitspracherecht künftiger Generationen ausgehen. (vgl. (Buschka, 2009, S. 96)).

Da bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe mindestens zwei sehr unterschiedliche Zeithorizonte zu berücksichtigen sind, die je auf zwei verschiedene Aspekte der intergenerationalen Gerechtigkeit als politischer und distributiver Fairness verweisen, müssen diese Zeiträume und der Generationenbegriff spezifiziert werden. Schon die Entsorgung als Prozess rührt an Fragen intergenerationaler Gerechtigkeit, da zum einen durch den bereits lang andauernden Prozess der Entsorgungsforschung ein Verantwortungsübertrag von Nutznießer- auf Entsorgergenerationen stattgefunden hat (Phase I), sowie durch die prognostizierten Zeithorizonte bis zum Abschluss der Entsorgung weitere Verantwortungsüberträge stattfinden werden (Phase II). Schließlich werden, bedingt durch die langen Zeithorizonte der Gefährdung durch radioaktive Stoffe auch weit in der Zukunft liegende Generationen affiziert (Phase III und Phase

IV). Wir haben es also zunächst mit Fragen der Generationengerechtigkeit im Nahfeld zu tun, die nicht allein in Fragen intragenerationaler Gerechtigkeit aufgehen, um anschließend zur intergenerationalen Gerechtigkeit im Fernfeld überzugehen. Die Zukunft ist, ethisch betrachtet, nicht homogen.

Um diese Problemlage zu schärfen, schlägt Kermisch eine Differenzierung zwischen *close future generations* und *remote future generations* vor. *Close* wären hiernach jene Generationen, welche noch Erinnerung und Wissen über die Reststoffe und ihren Lagerstandort haben, *remote* hingegen jene, welche diese Erinnerung verloren haben (Kermisch, 2016, S. 1799). Sie wendet diese Generationenbegriffe an den gleichen Entsorgungsoptionen an, welche ENTRIA untersucht, nennt sie jedoch Entsorgungsstrategien und legt damit einen stärker handlungstheoretischen Fokus. Wir halten diese Unterscheidung für sinnvoll, möchten sie aber nicht an „Erinnerung“ binden, denn sonst wäre eine Zukunft in 60.000 Jahren, die die Erinnerung bewahrt hätte, *ex definitione* noch eine „*close future*“. Richtig an dieser Unterscheidung ist, dass die Zeit der Zukunftsverantwortung nicht homogen ist und dass von einem Trade-Off zwischen näherer und fernerer Zukunft auszugehen ist (Ott u. Semper, 2017). Die nähere Zukunft (100 bis 200 Jahre) wird mit dem Projekt der Einlagerung stärker belastet als die fernere Zukunft, sofern die letztlich gefundene (Minimax-)Lösung (etwa ein wartungsfreies Tiefenlager mit einem Optimum aus techno- und geogenen Barrieren) erfolgreich sein wird. Die ferne Zukunft hat ja im Erfolgsfalle eines wartungsfreien Tiefenlagers mit den Reststoffe nichts mehr zu schaffen, d. h. keine diesbezüglichen Sorgen mehr. G-2 und G-3 und G-4 bewirken (bis ca. 2100) in diesem Fall eine zweite modale Transformation (Einlagerung), die im Erfolgsfalle alle nachfolgenden Generationen „entsorgt“. Das Problem wäre ein für allemal terminiert, d. h. gelöst.

Grundsätzlich liegt in der Entscheidung, welche Einlagerungsform gewählt wird, eine Abwägung, ökonomisch: ein Trade-Off zwischen sog. Handlungs- und Sorgenfreiheit künftiger Generationen (so Anne Eckhardt), welche sich unmittelbar auf die Paradigmen *storage* und *disposal* beziehen lässt. Eine wartungsfreie Entsorgung bietet idealiter Nachsorgefreiheit, die als Gebot im StandAG verankert ist, und befreit somit künftige Generationen von der Verantwortung, mit den Abfallstoffen umgehen zu müssen. Die Optionen Tiefenlagerung mit Rückholbarkeit und Oberflächenlagerung hingegen bieten größere Spielräume der Reversibilität und der Sicherheit durch mögliche Eingriffe. Dementsprechend aber legen sie künftigen Akteuren eine Handlungsverantwortung auf, und sei es nur, über einen endgültigen Verschluss oder die Verbringung in ein ande-

res Lager zu entscheiden (Ott u. Semper, 2017)⁶⁹. Auch wissen wir nicht, wie sich die governance-Kapazitäten im Verlauf des 21. Jahrhundert entwickeln werden. Die Unvorhersagbarkeit der Zukunft gerade unter der security-Hinsicht spricht gegen Zugänglichkeit. Insofern verweist das (auch im Bürgerforum und in der Delphi-Befragung) umstrittene Kriterium der Zugänglichkeit auf größere Horizonte der Zukunftsverantwortung in der prekären und risikoträchtigen Welt des Anthropozän (Ott, 2016).

3.8.6 Interdisziplinäre Einsichten zur langfristigen Oberflächenlagerung

Die detailreichste ethisch-interdisziplinäre Auseinandersetzung mit den Entsorgungsoptionen fand in enger Kooperation mit dem iBMB statt (vgl. Ott u. Budelmann (2017); Riemann (2017). In drei Beiträgen (Riemann u. Köhnke, 2016; Ott u. Budelmann, 2017; Riemann, 2017) wurde die langfristige Zwischen- oder Oberflächenlagerung einer handlungs- und gerechtigkeitstheoretischen Analyse unterzogen, die gleichzeitig Erkenntnisse für die Übertragung auf die anderen beiden Optionen lieferte.

Den Ausgangspunkt bildete eine philosophische und ingenieurwissenschaftliche Reflexion auf die Frage, welchen Stellenwert Oberflächenlagerung in einer Entsorgungsstrategie einnehmen kann. Die Zwischenlagerung, wie sie derzeit praktiziert wird, birgt folgendes Problem: die Genehmigungszeiten der bestehenden Lager werden aller Voraussicht nach nicht genügen, sondern vor Abschluss der Standortauswahl und Inbetriebnahme eines Tiefenlagers auslaufen. Aus dieser Lücke ergeben sich zwei Handlungsoptionen: 1. Die Genehmigungen und der Betrieb der Zwischenlager werden verlängert oder 2. Es wird eine konsolidierte Zwischenlagerung für einen längeren Zeitraum geplant. Hieraus ergibt das normative Postulat einer dezidierten Planung robusterer Zwischenlagersysteme für einen Zeitraum, der den Prognosen Rechnung trägt, um Zeit zu gewinnen für die Erforschung und Implementierung einer langzeitsicheren Entsorgung (Riemann u. Köhnke, 2016). Diese Forderung ist jedoch voraussetzungsreich und nicht ohne Risiko.

Ein Argument für eine langfristige Lagerung hoch radioaktiver Abfälle in Bauwerken an der Oberfläche ist der mit ihr erhoffte Zeitgewinn, d. h. der Zeitgewinn für die sich heute als langwierig erweisende Realisierung einer endgültigen Lagerung, Zeitgewinn für die Findung der best-

⁶⁹Selbst eine gründliche Erkundung durch Probebergwerke (an $x > 1$ Standorten) in unterschiedlichen Wirtsgesteinen könnte zu der Notwendigkeit einer Verbringung der Reststoffe in sicherheitstechnisch nachzurüstende Zwischenlager führen (Ott u. Budelmann, 2017). Siehe nachfolgender Abschnitt.

möglichen Lösung durch Forschung, Entwicklung und internationale Kooperation sowie Zeitgewinn für ein als gerecht empfundenes Verfahren zur Standortfindung für ein Endlager unter Tage. Auf dieser Linie hat schon (Shrader-Frechette, 1993, S. 215–218) argumentiert. Eines ihrer Prinzipien lautet: „Minimize scientific uncertainty by delaying the decision about permanent disposal“ (ebd., S. 216). Eine zeitliche Verschiebung der Entscheidung über eine endgültige Einlagerung soll für einen Zugewinn an wissenschaftlichem Wissen führen: „The main rationale for NMRS [negotiated, monitored, retrievable storage – KO/HB] is scientific“ (ebd., S. 217).

Die mit dem Betrieb eines Langfristzwischenlagerung (LFZL) verbundene erhöhte Belastung durch Wartung und Kontrolle und der größeren Anfälligkeit gegen Störungen und Eingriffe von außen, insbesondere unter dem Szenario eines instabileren politischen und gesellschaftlichen Umfeldes werden als starke Gegenargumente angeführt. Ein anderes Gegenargument bezieht sich auf die opportunistische Logik politischen Handelns. Ein LFZL werde wahrscheinlich den politischen Druck senken, mögliche Endlagerstandorte definieren zu müssen; das als langfristiges Provisorium gedachte LFZL werde zum Dauerzustand mit unkalkulierbaren Risiken.

Die Vermutung oder Hoffnung, später eine durch neues Wissen (z. B. Verbesserung der Langzeitsicherheitsnachweise für Tiefenlager) induzierte Umentscheidung im Hinblick auf derzeit als nicht weiterzuentwickelnd kategorisierte Alternativen treffen zu können, wird auch als Argument für einen Sicherheitsgewinn verstanden. Hierbei wird oft übersehen, dass jede Veränderung in der Strategie von passiven Sicherheitssystemen hin zu aktiven Sicherheitssystemen zusätzliche Ungewissheiten und Unsicherheiten birgt, die auf einer langen Zeitachse sowohl technisch angemessen sicher als auch organisatorisch und gesellschaftlich beherrschbar sein müssen. Angesichts der Wandelbarkeit und Unvorhersagbarkeit der sozialen und politischen Verhältnisse über längere Zeitspannen hinweg erscheinen Argumente zugunsten eines Zugewinns an security durch Oberflächenlagerung *prima facie* unplausibel. Also bringt ein langfristiges Oberflächenlager in beiden Dimensionen Nachteile mit: Es erlegt zukünftigen Generation die Bürde des Aufwandes auf und hat Sicherheitsnachteile, die zumindest hinsichtlich der Anlagensicherung (security) als unkalkulierbar gelten.

LFZL erweist sich allerdings unter bestimmten Umständen als unumgänglich bzw. als ein kleineres Übel auf dem langen Weg zu einem Endlager. Die Rechtfertigung von LFZL beruht also nicht auf dem Reversibilitäts-

oder Zugänglichkeitsargument. LFZL ließe sich begründen als „übergangsweise leider unumgänglich“ – und wohl nur so.

Die Frage lautet in präzisierter Form, ob es einen Weg von den derzeitigen Zwischenlagern, deren Situation in beiden normativen Dimensionen als unbefriedigend gilt, zu einem bestmöglichen Endlager gibt, der auf beiden Dimensionen akzeptabel ist, oder ob sich eine LFZL als übergangsweise unumgänglich erweist. Die Unumgänglichkeit impliziert den höheren Aufwand und das höhere Risiko für die Zwischengenerationen (Ott u. Budelmann, 2017).

Aus der Unumgänglichkeitsthese durch zu erwartende Prozessverzögerungen und den gleichzeitigen politischen Handlungsdruck, die Entsorgung radioaktiver Reststoffe möglichst rasch zu vollziehen, ergibt sich ein handlungspraktisches Dilemma (Riemann, 2017). Dieses Dilemma verweist auf die Janusköpfigkeit von buying-time-Strategien, da die Zeit, die man gewinnt, potentiell auch in Anspruch genommen wird, was zu einer Verschleppung der Problemlösung führen kann. Es besteht bei langfristiger Zwischenlagerung also die Gefahr, dass das Problembewusstsein mit der Zeit abnimmt und die Suche nach einem Tiefenlager allmählich einschläft.

3.8.7 Einsichten und Ausblicke

Die Untersuchungen zur Gerechtigkeit in ENTRIA, welche sich in eine Analyse des Kriteriums und der Spezifikation verschiedener „Gerechtigkeitssphären“ unterteilen lässt, eröffnet einen ethischen Beurteilungsraum für die drei Entsorgungsoptionen sowie den gesellschaftlichen Prozess der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Sie zeigen auf, dass es in der Verteilung und Bearbeitung des gesellschaftlichen und technischen Problems keine ideal gerechte Lösung gibt und dienen damit der Identifikation von Trade-Offs und Entscheidungsprioritäten für die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen.

Ein Paternalismus bei der Zukunftsverantwortung ist dabei unvermeidlich. Wie sollen wir wissen, ob zukünftige Menschen lieber ein im Idealfall wartungsfreies Tiefenlager oder ein langfristig zugängliches Oberflächenlager wollen? Wir können vermuten, dass zukünftige Menschen in dieser Frage ähnlich uneins sein werden wie wir selbst. Warum sollte sich unser heutiger Dissens in einen zukünftigen Konsens verwandeln?

Die distributive Ebene konzentrierte sich auf die Nicht-Idealität des Problems und die Notwendigkeit der Allokation eines negativen Gutes in konzentrierter Form. Hier wurde die Notwendigkeit eines vermittelnden Mediums exponiert, distributive Gerechtigkeit ist also nur durch ein

fairen Verfahren und ggf. über Kompensationsleistung überhaupt herstellbar. Die Möglichkeit der verhandelten Bereitwilligkeit sollte nicht unterschätzt werden. Wirkliche Beteiligungsformate dürfen den Bürgerinnen und Bürgern keine diesbezüglichen Denkverbote auferlegen. Letztlich entscheiden die Bürgerinnen und Bürger der betroffenen Regionen, wie sie die Situation und das negative Gut wahrnehmen, in welcher Semantik sie sprechen wollen und welche Optionen sie präferieren.

Freiwilligkeit darf nicht auf Kosten von bestmöglicher Sicherheit gehen. Aber es gibt Grenzen der Wissenschaft: Was ist, wenn die Anzahl geeigneter („bestmöglich sicherer“) Standorte größer Eins ist? Wenn es keinen Sinn mehr macht, minimale Differenzen an Sicherheit über extrem lange Zeiträume in Modellen berechnen zu wollen. Wenn die Wissenschaft an ihren Grenzen zugunsten der Politik abdankt (und gerade darin ihr Ethos hat). In diesem Fall könnte Bereitwilligkeit die Rolle des „Zünglein an der Waage“ spielen.

Wird Nicht-Belastung als zentrales Kriterium intergenerationaler Gerechtigkeit verstanden, so kann diese Norm bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe nicht eingehalten werden, da das Verursacherprinzip bereits heute verletzt ist. Die Norm lautet also auf geringstmögliche Belastung bei gleichzeitig größtmöglicher Einbeziehung naher Generationen. Die Zukunft ist nicht homogen; es bestehen Trade-Offs zwischen näherer und ferner Zukunft. Höhere Suchkosten belasten die nähere Zukunft, könnten aber die fernere Zukunft sicherer machen. Aber um wieviel sicherer?

Wir setzen im Anschluss an den Kommissionsbericht voraus, dass Elemente der drei näher untersuchten ENTRIA-Optionen mögliche Komponenten einer langfristigen Strategie sein werden. Für die einzelnen Entsorgungsoptionen lassen sich spezifische Gerechtigkeitsprobleme und Trade-Offs identifizieren:

Wartungsfreie Tiefenlagerung. Das passive Sicherheitskonzept ist auf Nachsorgefreiheit ausgelegt, um die Entsorgung möglichst definitiv zu gestalten und die Handlungsverantwortung nach Ende des Prozesses zu minimieren. Sie ist die einzige der drei Entsorgungsoptionen, die den Prozess der Entsorgung abschließt und damit im Erfolgsfall eine Sorgenfreiheit für künftige Generationen etablieren kann. Gleichzeitig minimiert sie die Eingriffsmöglichkeiten und erschwert die nachträgliche Korrektur der Anlage im Schadensfall. Sie unterstellt, dass passive Sicherheit (durch eine Verbindung aus geogenen und technogenen Barrieren) langfristig höher sein kann als Sicherheit, die auf der Fähigkeit des Eingreifens beruht. In vergangenen Debatten wurde diese Option

auch als abandonment (Edwards u. Del Tredici, 2013) oder burying uncertainty (Shrader-Frechette, 1993) bezeichnet. Nun kann Rückholbarkeit auch bei der Zielfunktion eines wartungsfreien Tiefenlagers für viele Jahrzehnte garantiert werden (bis 2070, vielleicht auch länger). In der Einlagerungsphase (Betriebsphase) wurde mit den Sicherheitsanforderungen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2010) erstmalig Rückholbarkeit und damit ein Element der Option „Tiefenlagerung mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit“ vorgeschrieben. Nach den Vorstellungen der Endlagerkommission kommt es hernach zu einer Phase, in der über Verschluss oder Rückholung zu entscheiden ist. Diese entspricht der in VP 6 untersuchten „Phase der Beobachtung und Überwachung“. Diese Entscheidung ist strikt als eine zukünftige offene Entscheidung zu denken. Demgemäß ist zu bauen. In jedem Fall sollte ein Tiefenlager so errichtet werden, dass sich zukünftige Generation für den Verschluss entscheiden können. Vielleicht verlieren sie ja in einem Zeitalter erneuerbarer Energie jegliches Interesse an solchen toxischen Substanzen.

Tiefenlagerung mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit. Die Tiefenlagerung mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit sucht einige Nachteile der wartungsfreien Tiefenlagerung auszuräumen, in dem sie den Zugang zu den radioaktiven Stoffen und deren Rückholung/Bergung erleichtert, wodurch ein gewisses Maß an Reversibilität erhalten bleibt. Sie ist die im StandAG präferierte Option. Neben den technischen Herausforderungen, die Rückholbarkeit mit sich bringt, ergeben sich Gerechtigkeitsprobleme. So fehlt in der „Phase der Beobachtung und Überwachung“ durch die Zugänglichkeit die Nachsorgefreiheit. Die Entscheidung, wann eine solche Anlage sicher ist und verschlossen werden kann, wird also vertagt zugunsten ihrer Kontrollierbarkeit. Der zentrale Trade-Off ist eine Frage der Perspektive, ob man die Rückholbarkeit als eine gelungene Synthese zwischen (Oberflächen)lagerung und Endlagerung betrachtet, in dem die Vorzüge beider herausarbeitet, oder ob sie ein fauler Kompromiss ist, der lediglich die Nachteile beider Optionen vereint (Riemann u. Chaudry, 2018).

Beide Tiefenlageroptionen sind darauf ausgelegt, die Reststoffe an einem Standort zu konzentrieren, was Lasten konzentriert. Gleichzeitig wird durch die Notwendigkeit geeigneter Gesteinsformationen die Standortauswahl stark eingeschränkt. Dieser Umstand führt auch auf prozeduraler Ebene insofern zu Gerechtigkeitsdefiziten, als eine Vorfestlegung auf bestimmte Regionen den Ausgang eines Verfahrens, und sei es noch so fair und transparent, prädestiniert. Dies war bereits bei der

Verabschiedung des StandAG eine berechtigte Kritik am Bild der „weißen Deutschlandkarte“. Dieses Bild markiert aber nur eine Ausgangssituation; es war klar, dass diese weiße Deutschlandkarte im Verlauf der Standortsuche eingefärbt werden würde: näher in Erwägung zu ziehende Regionen, Standorte für Probebohrungen etc. In näherer Zukunft wird entscheidend sein, ob kristalline Gesteinsinformationen aufgrund ihrer Nachteile als Standorte ausscheiden sollen, was im Interesse einiger Bundesländer wäre, oder ob aus Gründen der Parität auch ein Probebergwerk in kristallinen Formationen errichtet werden soll.

Die zukünftige Entscheidungsgrundlage können wir im Jahre 2018 nicht kennen, da in sie sämtliche weltweiten Erfahrungen mit radioaktiven Reststoffen zwischen 2018 und 2080 eingehen werden, die wir prinzipiell nicht gedanklich simulieren können. Zukünftige Generationen haben das Recht, das zunächst zugängliche Bergwerk allmählich in ein wartungsfreies Tiefenlager zu überführen; eine intergenerationelle Pflicht zur permanenten Offenhaltung lässt sich nicht begründen (Ott u. Semper, 2017). Die Strategie abnehmender Zugänglichkeit bei Beibehaltung von Vorkehrungen zur Bergbarkeit im Schadensfall könnte den Trade-Off zwischen Handlungs- und Sorgenfreiheit prozessieren, hätte aber einen klaren Richtungssinn.

Oberflächenlagerung. Bei der Oberflächenlagerung können die Abfälle prinzipiell auf mehrere Standorte relativ unabhängig von der geologischen Konstitution verteilt werden, was ein Argument für burden sharing und einen ergebnisoffenen Prozess sein kann. Eine Standortauswahl für Oberflächenlager ist im Hinblick auf Sicherheit weniger stark an geologische und geografische Randbedingungen gebunden als eine Standortauswahl für ein Tiefenlager. Entsprechend ergeben sich mehr Freiheitsgrade im Hinblick auf prozedurale und distributive Gerechtigkeit. Gleichzeitig wird der Aufwand zur Handhabung und Kontrolle der Stoffe gegenüber den anderen Optionen reduziert. Die Option ist aber auf fortgesetztes Handeln angewiesen, da ihr Sicherheitskonzept ohne Wartung nicht funktioniert. Sie ist also keine definitive Entsorgungsoption, sondern eine Form der Lagerung „bis auf weiteres“. Sie fokussiert die Handlungsfreiheit künftiger Generationen (Riemann u. Chaudry, 2018, Beitrag H. Budelmann), vernachlässigt dabei jedoch die Sorgenfreiheit. Mit den Abfällen wird dementsprechend Verantwortung vererbt.

Die Suchprozesse könnten je nach veranschlagten Zeitbedarf und Verzögerungen eine langfristige Zwischenlagerung an der Oberfläche (LOL) unumgänglich machen (Ott u. Budelmann, 2017). LOL ist letztlich eine buying-time-Strategie, die vor der Frage steht, wofür man sich die Zeit

kaufen möchte. Es bestehen Trade-Offs auf der Zeitschiene und im Hinblick auf Zugewinn an Sicherheit. Und es besteht die Gefahr, dass bei LOL die Suche nach Tiefenlagern „einschläft“ (Ott u. Budelmann, 2017). Politisch wäre eine Parallelsuche nach Oberflächen- und Endlagern extrem schwierig und kostenträchtig.

Rein theoretisch kann man das Problem des sogenannten optimal stopping point heranziehen, um die Sinnhaftigkeit zusätzlicher Suchprozesse und fortwährender Zugänglichkeit zu beurteilen. Wenn eine unaufhörliche Suche nach der allerbesten Lösung zu gar keiner Lösung führt (man sucht den allerbesten Lebenspartner und bleibt am Ende allein), dann ist nicht jede nochmalige Überprüfung ein Gewinn. Das Problem des optimal stopping point stellt sich auch in praktischen Diskursen. Wenn keine neuen Gründe vorgebracht werden und eine Endlosschleife an bekannten Gründen angesichts von Handlungs- und Zeitdruck keine zusätzlichen Rationalitätsgewinne mehr erbringt, ist es an der Zeit, zu Entscheidungen zu kommen. Dies betrifft sowohl die Standort- als auch (später) die Verschlussfrage.

Für die nähere Zukunft stellt sich in beiden Dimensionen (Sicherheit, Gerechtigkeit) ein „timing“-Problem (Ott u. Budelmann, 2017). Was bedeuten in diesem Zusammenhang zeitbezogene Werturteile („Verzögerung“, „Beschleunigung“)? Was meinen wir genau, wenn wir bspw. sagen, wir sollten uns bei der Standortsuche beeilen, ohne zu überstürzen? Solche „timing“-Probleme im Rahmen einer Langfriststrategie ethisch zu analysieren, beträte moral- und werttheoretisches Neuland.

Es besteht die Gefahr der „wicked communication“ als „wickedness“ zweiter Ordnung. Das Problem der rhetorisch-persuasiven Elemente in praktischen Deliberationen zwischen Entscheidern und Betroffenen bzw. zwischen Risiko und Gefahr (Luhmann) wird sich geltend machen, sobald die Endausscheidung näher rückt. Es werden sich Spannungen aufbauen zwischen Diskursidealen und realen Redehandlungen. Philosophisch betrachtet, wäre im Rahmen einer Theorie deliberativer Demokratie das Problemfeld der Rhetorik zu untersuchen, das schon bei den ENTRIA-Plädoyers virulent wurde (Riemann u. Chaudry, 2018).

Es besteht die Aufgabe, die diskursiven Rationalitätsgewinne der vergangenen Jahre in die nächste Phase „aufzuheben“ (Hegel). Es wäre auch denkbar, dass in der kommenden Suchphase die Formen der Kommunikation wieder in agonale Polemik übergehen. Hier bedarf es dringend institutionalisierter Sicherungen der Rationalitätsgewinne, d. h. eine Art „Diskurs-Gedächtnis“ als Wissensspeicher. Die neuen Institutionen sollten (auch auf der Ebene des Personals) ein kollektives Gedächtnis der Einlagerungsproblematik beinhalten.

Literatur

- [Arendt 1970] Arendt, Hannah: *Macht und Gewalt*. München: Piper, 1970
- [Aristoteles 1969] Aristoteles: Nikomachische Ethik. In: *Werke in deutscher Übersetzung* Bd. 6. Darmstadt: WBG, 1969 – Übers. v. Dirlmeier, Franz
- [Bandelow u. Thies 2014] Bandelow, Nils C.; Thies, Barbara: Gerechtigkeitsempfinden bei Großprojekten als Ursache von Konfliktsituationen? Vertrauen und Legitimität als moderierende Faktoren illustriert am Beispiel der Konflikte um die Erweiterung des Frankfurter Flughafens. In: *Politische Psychologie – Journal of Political Psychology* 2014 (2014), Nr. 1, S. 24 ff
- [Benjamin 1999] Benjamin, Walter: *Zur Kritik der Gewalt und andere Aufsätze*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1999
- [Birnbacher 1988] Birnbacher, Dieter: *Verantwortung für zukünftige Generationen*. Stuttgart: Reclam, 1988
- [Bornemann 2018] Bornemann, Basil: Emotion, Konflikt und Partizipation – Politikwissenschaftliche Perspektiven auf die Rollen von Emotionen im Konflikt um die Endlagerung radioaktiver Abfälle und dessen partizipative Bearbeitung. In: (Smeddinck, 2018a), S. 85–118
- [Brunnengräber 2016] Brunnengräber, Achim (Hrsg.): *Problemfälle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll*. Baden-Baden: edition sigma, 2016
- [Brunnengräber u. Di Nucci 2017] Brunnengräber, Achim; Di Nucci, Maria R.: Freiwilligkeit als Königsweg bei der Standortsuche für radioaktive Reststoffe? In: *Kursbuch Bürgerbeteiligung #2* Bd. 2. Berlin: Institut für Partizipation, 2017, S. 139–157
- [Bundesamt für Strahlenschutz 2002] Bundesamt für Strahlenschutz (Hrsg.): *Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte*. Köln, 2002
- [Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2010] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin, September 2010 – Forschungsbericht – 22 S.

- [Buschka 2009] Buschka, Sonja: *Ethische Normen für eine zukünftigen Generationen gegenüber moralisch vertretbare (End-) Lagerung hochradioaktiver Abfälle*. Hamburg, Universität Hamburg (UHH), Masterarbeit, 2009
- [Caney 2005] Caney, Simon: *Justice Beyond Borders: A Global Political Theory*. Oxford University Press, 2005
- [Di Nucci 2016] Di Nucci, Maria R.: NIMBY oder IMBY: Akzeptanz, Freiwilligkeit und Kompensationen in der Standortsuche für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. In: (Brunnengräber, 2016), S. 119–143
- [Domasch u. Zschiesche 2018] Domasch, Silke; Zschiesche, Michael: Erhebung, Analyse und Bewertung von Maßnahmen der Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren / Unabhängiges Institut für Umweltfragen. Berlin, 2018 – Gutachten – Im Auftrag des Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE).
- [Drögemüller 2016] Drögemüller, Cord: Das Standortauswahlverfahren. Kommunen und BürgerInnen in der Endlager-Governance. In: (Brunnengräber, 2016), S. 187–210
- [Eckhardt u. Rippe 2016] Eckhardt, Anne; Rippe, Klaus P.: *Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Zürich: vdf Hochschulverlag, 2016
- [Edwards u. Del Tredici 2013] Edwards, Gordon; Del Tredici, Robert: Examples of Rolling Stewardship Beyond One or Two Generations / Canadian Coalition for Nuclear Responsibility. http://www.ccnr.org/CCNR_Undertaking_final.pdf. 2013 (U-21) – Undertaking report
- [Endlagerkommission 2016] Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Hrsg.). Deutscher Bundestag: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Verantwortung für die Zukunft: Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes / Deutscher Bundestag. Berlin, 2016 (18/9100) – Bundestagsdrucksache – 684 S.
- [Erbguth u. Schlacke 2016] Erbguth, Wilfried; Schlacke, Sabine: *Umweltrecht*. 6. Aufl. Baden-Baden: Nomos, 2016
- [Fehling 2012] Fehling, Michael: Informelles Verwaltungshandeln. In: *Grundlagen des Verwaltungsrechts. Informationsordnung - Verwaltungsverfahren - Handlungsformen* Bd. 2. 2. Aufl. München: Beck, 2012, S. 1557–1523

- [Gärditz 2013] Gärditz, Klaus F.: Zeitprobleme des Umweltrechts. In: *Eu-rUP* 11 (2013), Nr. 1, S. 2–16
- [Gärditz 2016] Gärditz, Klaus F.: Kommentierung zu Art. 20 a. In: *Umweltrecht*. München: C. H. Beck, 2016
- [Götter 2018] Götter, Christian: Emotionen als Argument – Die Debatte um die Kernenergie im Biblis der 1970er Jahre. In: (Smeddinck, 2018a), S. 29–48
- [Habermas 1992] Habermas, Jürgen: *Faktizität und Geltung. Beiträge zur Diskurstheorie des Rechts und des demokratischen Rechtsstaats*. 1. Aufl. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1992
- [Hahn 2017] Hahn, Susanne: *Rationalität – Eine Kartierung*. 2. Aufl. Münster: Mentis, 2017
- [Hehn u. Wagner 2016] Hehn, Marcus; Wagner, Jörg: Mediation im öffentlichen Bereich – Teil 3: Besonderheiten und praktische Fragen. In: *UPR Umwelt- und Planungsrecht* 36 (2016), Nr. 2, S. 41–47
- [Hoffmann-Riem 2006] Hoffmann-Riem, Wolfgang: Die Klugheit der Entscheidung ruht in ihrer Herstellung – selbst bei der Anwendung von Recht. In: Scherzberg, Arno (Hrsg.); Betsch, Tilmann (Hrsg.); Tagung, Erfurter S. (Hrsg.): *Kluges Entscheiden: disziplinäre Grundlagen und interdisziplinäre Verknüpfungen*; [... 17. - 19.02.2005 ... Ersten Erfurter Staatswissenschaftliche Tagung ...]. Tübingen: Mohr Siebeck, 2006 (Neue Staatswissenschaften 4), S. 3–23
- [Hofmann 1981] Hofmann, Hasso: *Rechtsfragen der atomaren Entsorgung*. Stuttgart: Klett-Cotta, 1981
- [Ipsen 2006] Ipsen, Detlev: Bürgerbeteiligung und Regionalentwicklung am Standort für ein atomares Endlager. Berlin: edition sigma, 2006 (Gesellschaft - Technik - Umwelt), S. 105–118
- [Jonas 1979] Jonas, Hans: *Das Prinzip Verantwortung. Versuch einer Ethik für die technologische Zivilisation*. Frankfurt/M.: Insel, 1979
- [Josipovic 2018] Josipovic, Neven: Chancen und Risiken von „Freiwilligkeitsansätzen“ bei der Endlagersuche – eine Untersuchung am Beispiel von Schweden, Frankreich und Großbritannien. In: (Ott u. Smeddinck, 2018), S. 127–163
- [Kaufmann 2016] Kaufmann, Johannes: Bürger-Wut ist konstruktiv. In: *Braunschweiger Zeitung* (2016), Nr. 9.7.2016, S. 2

- [Kermisch 2016] Kermisch, Celine: Specifying the Concept of Future Generations for Addressing Issues Related to High-Level Radioactive Waste. In: *Science and Engineering Ethics* 22 (2016), Nr. 6, S. 1797–1811
- [Klauer u. a. 2013] Klauer, Bernd; Manstetten, Reiner; Petersen, Thomas; Schiller, Johannes: *Die Kunst langfristig zu denken: Wege zur Nachhaltigkeit*. Baden-Baden: Nomos, 2013
- [Köhnke u. a. 2017] Köhnke, Dennis (Hrsg.); Reichardt, Manuel (Hrsg.); Semper, Franziska (Hrsg.): *Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle: Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen*. Wiesbaden: Springer, 2017
- [Lüdemann u. Große Gehling 2016] Lüdemann, Volker; Große Gehling, Juliette: Zustimmung gegen Geld? Zur finanziellen Kompensation von Kommunen beim Netzausbau. In: *EnWZ* (2016), Nr. 4, S. 147–153
- [Manemann 2015] Manemann, Jürgen: *Kurzvortrag zur Anhörung „Rückholung/Rückholbarkeit hoch radioaktiver Abfälle aus einem Endlager, Reversibilität von Entscheidungen“*. 2015
- [Marti 2016] Marti, Michèle: Risikoansichten. Wie Merkmale der Person, der Quelle und des Rahmens die Art und Weise beeinflussen, wie Personen die mit der Entsorgung von radioaktiven Abfällen verbundenen Risiken wahrnehmen und bewerten. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2016 (5) – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Mazouz 2012] Mazouz, Nadja: Gerechtigkeit. In: *Handbuch Ethik*. Stuttgart: J. B. Metzler, 2012, S. 365–370
- [Michel 2015] Michel, Rolf: *Strahlenschutz und Risikowahrnehmung. Beitrag zur 19. LPS Sommerschule, 22.6. – 26.6.2015*. https://www.irs.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/151112_Michel_Strahlenschutz_Risikowahrnehmung_03.pdf. Abruf: 5.12.2017
- [Murswiek 1988] Murswiek, Dietrich: Freiheit und Freiwilligkeit im Umweltrecht. In: *JZ* 43 (1988), Nr. 21, S. 985–993
- [Nanz u. Leggewie 2016] Nanz, Patrizia; Leggewie, Claus: *Die Konsultative: mehr Demokratie durch Bürgerbeteiligung*. Berlin: Verlag Klaus Wagenbach, 2016 (Politik bei Wagenbach 749)

- [Nietzsche 1999] Nietzsche, Friedrich: *Also sprach Zarathustra. Ein Buch für alle und keinen*. München: Deutscher Taschenbuch Verlag, 1999 – Kritische Studienausgabe, Band 4.
- [Ott 2005] Ott, Konrad: *Moralbegründungen zur Einführung*. Hamburg: Junius, 2005
- [Ott 2014] Ott, Konrad: Institutionalizing strong sustainability: A Rawlsian perspective. In: *Sustainability* 6 (2014), Nr. 2, S. 894–912
- [Ott 2016] Ott, Konrad: Verantwortung im Anthropozän und Konzepte von Nachhaltigkeit. In: Patenge, Markus (Hrsg.); Beck, Roman (Hrsg.); Luber, Markus (Hrsg.): *Schöpfung bewahren – Theologie und Kirche als Impulsgeber für eine nachhaltige Entwicklung*. Regensburg: Pustet Verlag, 2016, S. 64–104
- [Ott u. Budelmann 2017] Ott, Konrad; Budelmann, Harald: Oder vielleicht doch nicht unter die Erde - Überlegungen zur Rolle der Oberflächenlagerung in einer Entsorgungsstrategie. In: (Köhnke u. a., 2017), S. 11–27
- [Ott u. Döring 2004] Ott, Konrad; Döring, Ralf: *Ökologie und Wirtschaftsforschung*. Bd. 54: *Theorie und Praxis starker Nachhaltigkeit*. Marburg: Metropolis-Verlag, 2004
- [Ott u. Riemann 2018] Ott, Konrad; Riemann, Moritz: „Volenti non fiat iniuriam” – Freiwilligkeit und Bereitwilligkeit bei der Übernahme von Standortverantwortung. In: (Ott u. Smeddinck, 2018), S. 42–60
- [Ott u. Semper 2017] Ott, Konrad; Semper, Franziska: Nicht von meiner Welt – Zukunftsverantwortung bei der Endlagerung von radioaktiven Reststoffen. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2017), Nr. 2, S. 100–102
- [Ott u. Smeddinck 2018] Ott, Konrad (Hrsg.); Smeddinck, Ulrich (Hrsg.): *Umwelt, Gerechtigkeit, Freiwilligkeit – insbesondere bei der Realisierung eines Endlagers*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2018
- [Plamper 2012] Plamper, Jan: *Geschichte und Gefühl – Grundlagen der Emotionsgeschichte*. München: Siedler, 2012
- [Radkau u. Hahn 2013] Radkau, Joachim; Hahn, Lothar: *Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft*. München: Oekom, 2013
- [Rawls 2003] Rawls, John; Kelly, Erin (Hrsg.): *Gerechtigkeit als Fairneß – Ein Neuentwurf*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 2003 – Aus dem Amerikanischen von Joachim Schulte

- [Rehbinder 2015] Rehbinder, Eckard: Rechtliche Grenzen für die Beendigung umweltrechtlicher Verbandsklagen gegen Entgelt. In: *Natur und Recht* 37 (2015), Nr. 11, S. 733–741
- [Reichold 2018] Reichold, Anne: Empörung im Kontext von Debatten um ein Endlager für Atommüll – eine philosophische Analyse. In: (Smedinck, 2018a), S. 159–182
- [Renn u. a. 2014] Renn, Ortwin; Köck, Wolfgang; Schweizer, Pia-Johanna; Bovet, Jana; Benighaus, Christina; Scheel, Oliver; Schröter, Regina: Öffentlichkeitsbeteiligung bei Vorhaben der Energiewende – Neun Thesen zum Einsatz und zur Gestaltung der Öffentlichkeitsarbeit. In: *Zeitschrift für Umweltrecht* 2014 (2014), Nr. 5, S. 281–288
- [Riemann 2017] Riemann, Moritz: Gerechtigkeit an der Oberfläche. In: (Köhnke u. a., 2017), S. 159–171
- [Riemann u. Chaudry 2018] Riemann, Moritz; Chaudry, Saleem: Plädoyers und Gegenreden. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2018 – ENTRIA Arbeitsbericht – Mit weiteren Beiträgen von K.-J. Röhligh, J. Stahlmann, H. Budelmann, S. Kuppler. In Vorbereitung.
- [Riemann u. Köhnke 2016] Riemann, Moritz; Köhnke, Dennis: Interdisziplinarität als Induktion – Von Ingenieuren und Philosophen. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, 105–110
- [Rossen-Stadtfeld 2012] Rossen-Stadtfeld, Helge: § 29. Beteiligung, Partizipation und Öffentlichkeit. In: *Grundlagen des Verwaltungsrechts. Band II*. 2. Aufl. Berlin: C. H. Beck, 2012, S. 663–730
- [Roßnagel u. a. 2014] Roßnagel, Alexander; Ewen, Christoph; Götz, Konrad; Hefter, Tomas; Hentschel, Anja; Huge, Antonia; Schönfelde, Carla: Mit Interessengegensätzen fair umgehen – zum Einbezug der Öffentlichkeit in Entscheidungsprozesse zu dezentralen Energieanlagen. In: *ZNER* 18 (2014), Nr. 4, S. 329–337

- [Röhlig u.a. 2014] Röhlig, Klaus-Jürgen; Walther, Clemens; Bach, Friedrich-Wilhelm; Brunnengräber, Achim; Budelmann, Harald; Chaudry, Saleem; Eckhardt, Anne; Geckeis, Horst; Grunwald, Armin; Hassel, Thomas; Hocke, Peter; Lux, Karl-Heinz; Mengel, Kurt; Metz, Volker; Ott, Konrad; Plischke, Elmar; Riemann, Moritz; Smeddinck, Ulrich; Schreurs, Miranda A.; Stahlmann, Joachim: Memorandum zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe. https://www.entria.de/fileadmin/entria/Dokumente/ENTRIA_Memorandum_140430.pdf. Hannover, 2014 – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Sandel 2013] Sandel, Michael J.: *Gerechtigkeit – Wie wir das Richtige tun*. Berlin: Ullstein, 2013
- [Schneider 2002] Schneider, Hans: *Gesetzgebung*. 3. Aufl. Heidelberg: C. F. Müller, 2002
- [Schopenhauer 1950] Schopenhauer, Arthur: Preisschrift über die Grundlage der Moral. In: *Werke* Bd. 4. 1950
- [Schützeichel 2016] Schützeichel, Rainer: Zur Soziologie des Rechtsgefühls. In: *Recht und Emotion / Verkannte Zusammenhänge*. Freiburg / München: Alber, 2016, S. 65–99
- [Shrader-Frechette 1993] Shrader-Frechette, Kristin: *Burying Uncertainty. The Case against Geological Disposal of Nuclear Waste*. Berkeley: University of California Press, 1993
- [Smeddinck 2014] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.): *Das Recht der Atommüllsorgung. Textsammlung mit Einführung*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2014
- [Smeddinck 2016] Smeddinck, Ulrich: Synergien oder Reibungsverluste? Wer koordiniert die Institutionen/Aktivitäten und führt sie zusammen? In: *Loccumer Protokolle. Endlagersuche. Endlager-Kommission und Öffentlichkeit(en): Fragen nach Zusammenarbeit und Fortschritten im Prozess zur Halbzeit der Kommission* Bd. 2014. Rehburg-Loccum: Evangelische Akademie Loccum, 2016, S. 69–80
- [Smeddinck 2017] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.): *StandAG. Standortauswahlgesetz. Kommentar*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2017
- [Smeddinck 2018a] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.): *Emotionen bei der Realisierung eines Endlagers*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2018

- [Smeddinck 2018b] Smeddinck, Ulrich: Recht, Atommüll und Emotionen – Eine Annäherung an verschiedene Facetten des Konfliktfeldes. (Smeddinck, 2018a), S. 119–152
- [Smeddinck 2018c] Smeddinck, Ulrich: „Freiwilligkeit“ bei der Realisierung eines Endlagers für Atommüll - zu Kompensationen ohne Beeinträchtigung konkreter Rechtspositionen. In: (Ott u. Smeddinck, 2018), S. 59–100
- [Smeddinck u. Roßegger 2013] Smeddinck, Ulrich; Roßegger, Ulf: Partizipation bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe - unter besonderer Berücksichtigung des Standortauswahlgesetzes. In: *Natur+Recht* 35 (2013), Nr. 8, S. 548–556
- [Smeddinck u. Semper 2016] Smeddinck, Ulrich; Semper, Franziska: Zur Kritik am Standortauswahlgesetz. Eine rechtswissenschaftliche Sicht auf gesellschaftspolitische Debatten. In: (Brunnengräber, 2016), S. 235–260
- [Steinberg 2011] Steinberg, Rudolf: Die Bewältigung von Infrastrukturvorhaben durch Verwaltungsverfahren – eine Bilanz. In: *ZUR* (2011), Nr. 7–8, S. 340–350
- [Thies u. a. 2018] Thies, Barbara; Misamer, Melanie; Henk, Florian: Protestverhalten aus psychologischer Perspektive. In: (Smeddinck, 2018a), S. 49–82
- [Tremmel 2012] Tremmel, Jörg C.: *Eine Theorie der Generationengerechtigkeit*. Münster: Mentis, 2012
- [Unnerstall 1999] Unnerstall, Herwig: *Rechte zukünftiger Generationen*. Würzburg: Königshausen & Neumann, 1999
- [Voßkuhle 1999] Voßkuhle, Andreas: *Das Kompensationsprinzip*. Tübingen: Mohr Siebeck, 1999
- [Walzer 1998] Walzer, Michael: *Sphären der Gerechtigkeit – Ein Plädoyer für Pluralität und Gleichheit*. Frankfurt/M.: Campus, 1998
- [Weisensee 2018] Weisensee, Claudius: Ein Belastungsausgleich für das „Atomdreieck“ – Das Gesetz über die „Stiftung Zukunftsfonds Asse“. In: (Ott u. Smeddinck, 2018)
- [Weisker 2005] Weisker, Albrecht: Powered by Emotion? Affektive Aspekte in der westdeutschen Kernenergiegeschichte zwischen Technikvertrauen und Apokalypseangst. In: *Natur- und Umweltschutz nach 1945*. Frankfurt/M., New York: Campus, 2005, S. 203–221

4 Synthese: Bewertungsgrundlagen

4.1 Der Forschungsgegenstand der Plattform ENTRIA

Das Verbundprojekt ENTRIA leistete Forschungsarbeit zu ausgewählten Sachverhalten aus dem Themenkomplex der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Diese Forschung war sowohl disziplinär als auch interdisziplinär angelegt.

Im Rahmen disziplinärer und interdisziplinärer Analysen wurden Aussagen zu Gesichtspunkten der Entsorgungsaufgabe formuliert. Bekannte Fragestellungen werden, häufig erstmals, wissenschaftsübergreifend (vgl. Chaudry u. Plischke (2016)) interdisziplinär beantwortet. Neue interdisziplinäre Fragestellungen wurden erarbeitet und beantwortet.

Diese Forschung mündete in die Entwicklung und Formulierung von Bewertungsgrundlagen für die betrachteten Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe und damit die „Identifizierung der besten Argumente für die Entsorgung“ (Grunwald, 2016). Der Anspruch, umfassende Analysen zu erstellen, muss in Bezug auf die Arbeit von ENTRIA jedoch eingeschränkt werden. An ENTRIA waren Wissenschaftler der Geistes- und Sozialwissenschaften, der Naturwissenschaften und der Ingenieurwissenschaften beteiligt. Die Arbeit der Forschungsplattform war insofern nicht umfassend, als nicht alle für die Entsorgung radioaktiver Reststoffe relevanten Aspekte disziplinär abgedeckt wurden. Ein Beispiel ist die Frage nach den ökonomischen Auswirkungen der Entsorgungsaufgabe, die im Projekt zwar nicht ausgeblendet, aber auch nicht explizit untersucht wurde. Zum anderen war die Erstellung umfassender Analysen zu einzelnen Aspekten aus Gründen begrenzter Kapazität nicht möglich.

4.2 Bewertungsgrundlagen

Jede Option zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe muss grundsätzlichen Ansprüchen genügen, die in ethischen, wissenschaftlichen, politischen und gesellschaftlichen Überlegungen gründen. Eine Architektonik, eine

Darstellung der inneren Systematik, dieser Ansprüche wird in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

Darüber hinaus muss eine Reihe rechtlicher, technischer etc. Voraussetzungen erfüllt sein, damit eine Entsorgungsoption für eine vergleichende Bewertung grundsätzlich in Frage kommt. So wird zum Beispiel davon ausgegangen, dass jede der drei betrachteten Optionen in Deutschland in genehmigungsfähiger Weise umgesetzt werden kann. Im Memorandum zur Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe (Röhlig u. a., 2014) wird im Hinblick auf die drei im Forschungsprojekt ENTRIA eingehender betrachteten Entsorgungsoptionen näher auf diese Voraussetzungen eingegangen.

Um einen Vergleich von Entsorgungsoptionen zu ermöglichen, muss eine Operationalisierung der Ansprüche und Voraussetzungen in Form von Kriterien stattfinden. Diese Kriterien helfen zudem dabei, Optionen zu vergleichen respektive aufzuzeigen, an welcher Stelle ein Vergleich überhaupt sinnvoll ist. Diese Ansprüche, Voraussetzungen und Kriterien sind die Bewertungsgrundlagen der Forschungsplattform ENTRIA.

4.3 Wissenschaftsethos als Leitmotiv der wissenschaftlichen Praxis

Die Entwicklung der hier vorgestellten Bewertungsgrundlagen stellte die zentrale interdisziplinäre Aufgabe von ENTRIA dar. Interdisziplinarität bezieht sich auf die Aufgabe der internen Integration von Forschungsergebnissen aus unterschiedlichen Disziplinen, die jeweils disziplinären Standards genügen. In diesem Sinne setzt Interdisziplinarität Disziplinarität voraus.

Der oben skizzierte Forschungsgegenstand ist ein lebensweltliches Problem, das gesellschaftlich zu lösen ist und politische Entscheidungen fordert. Bezogen auf die Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe wurde dies im ENTRIA-Memorandum als „wicked problem“ beschrieben. Wie für Wicked Problems charakteristisch finden sich keine allgemein akzeptierten, bereits bekannten Lösungen. Einer rein wissenschaftlichen Bearbeitung solcher Probleme sind daher Grenzen gesetzt. Interdisziplinäre Zusammenarbeit bei der Forschung ermöglicht eine Erweiterung der jeweiligen fachlichen Perspektive und somit ein tiefergehendes Verständnis der vielen Facetten des Problems als das bei rein disziplinär ausgebildeten Experten der Fall ist. Problemorientierte Wissenschaft sollte sich, im Sinne anspruchsvoller interdisziplinärer Forschung, nach heutigem Stand der Dis-

kussion nach außen öffnen und außerwissenschaftlich generiertes Wissen einbeziehen.

So erzielte wissenschaftliche Ergebnisse müssen dann wiederum, im Sinne von Qualitätssicherung, dem Anspruch nach externer Kohärenz, d. h. Passfähigkeit zum jeweiligen Problemlösekontext, gerecht werden (Grunwald, 2016). In ENTRIA wurde nicht transdisziplinär geforscht, mit dem Bürgerforum und den Werkstattgesprächen sind allerdings integrative Elemente in die Arbeit eingeflossen.

Nach (Luhmann, 1987) folgen unterschiedliche soziale Systeme unterschiedlichen Leitcodes. Politischer Erfolg bemisst sich nach anderen Kriterien als wissenschaftliche Leistungen. Daher muss das Aufnehmen von Impulsen und Themen und die Ausrichtung der Forschung, insbesondere im Rahmen transdisziplinärer Kommunikation, aus der Perspektive von Wissenschaft nach Maßgabe wissenschaftlicher Prinzipien gestaltet werden und nicht dadurch, dass man sich den Kriterien des politischen Systems anbequemt. Dies ist die unhintergehbare Voraussetzung für die Aufbereitung wissenschaftlicher Erkenntnisse, um in politischen Entscheidungsprozessen berücksichtigt zu werden.

Der Leitcode wissenschaftlicher Kommunikation ist ausgerichtet an „wahrem“ (geprüftem, verlässlichem, „objektivem“, robustem usw.) Wissen, das methodisch generiert und der kritischen Prüfung ausgesetzt werden muss. Die Praxis der Wissenschaft ist Wahrheitssuche unter strengen Regeln (Merton, 1938). Nach einem Vorschlag von Ott (1997) gründen die allgemeinen Regeln der Wissenschaft auf systematischem Vorgehen und wissenschaftlichem Ethos, nicht auf bestimmten Methoden der Einzelwissenschaften (wie Induktion, Modellierung, hermeneutisches Verstehen usw.).

Das wissenschaftliche Ethos verpflichtet alle, die sich auf die Praxis von Wissenschaft einlassen (und a fortiori alle, die Wissenschaft als Beruf betreiben), zu korrektem Umgang mit Daten, zur Kontrollierbarkeit und Nachprüfbarkeit aller Aussagen, zur Bestimmung von Grenzen des Wissens, zur Darlegung von Wissenslücken und Modellannahmen, zur Trennung von empirischen und normativen Aussagen, zum fairen Umgang mit geistigem Eigentum anderer, zur Berücksichtigung des aktuellen Standes der Forschung, zur Nutzung des Expertendiskurses als Wissensgrundlage und der Anerkennung wissenschaftlicher Dissense als offene Fragen usw. Die Einhaltung dieser Standards kann als Qualitätskriterium für wissenschaftliches Arbeiten aufgefasst werden. Im Rahmen interdisziplinärer Zusammenarbeit können diese Standards um die Forderung nach Offenheit gegenüber unterschiedlichen disziplinären Ansätzen und die Ein-

bindung solcher Ansätze in die Untersuchung sowie die Notwendigkeit zum Arbeiten mit klar definierten Begriffen¹ ergänzt werden.

Von Paschen u. Petermann (1992) wurde ein idealtypisches Konzept der Technikfolgenabschätzung (TA) entwickelt, das auf folgenden fünf Postulaten beruht:

- TA-Analysen sollen die Realisierungsbedingungen und potentiellen Folgewirkungen des Einsatzes von Techniken antizipieren und damit der „Frühwarnung“ dienen.
- Das Spektrum der Auswirkungen, die im Rahmen von TA-Analysen zu identifizieren, abzuschätzen und zu bewerten sind, soll „umfassend“ (comprehensive) sein.
- TA-Analysen sollen „entscheidungsorientiert“ sein.
- Technology Assessment soll „partizipatorisch“ angelegt sein, nicht „elitistisch“.
- Forderung nach Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Nachprüfbarkeit der TA-Prozesse: Annahmen und Werturteile und deren Begründung sollen offengelegt werden.

Dieses Konzept kann als TA-spezifisches Ethos interpretiert werden, das im Rahmen der Forschungsplattform ENTRIA auch auf den vorliegenden Forschungsgegenstand angewendet wird. Eine Antizipation möglicher Folgewirkungen von Technik muss sich dabei auf die Entsorgung und die damit verbundenen Infrastrukturmaßnahmen beschränken.

4.4 Akzeptabilität und Diskursivität

Aus dem internen wissenschaftlichen Ethos und dem TA-Idealkonzept lässt sich ein Leitbild von Akzeptabilität gewinnen, das von faktischer Akzeptanz unterschieden ist: „Der Begriff der Akzeptanz bezieht sich dabei auf die Frage, ob etwas faktisch Zustimmung findet oder nicht, während sich der Begriff der Akzeptabilität auf die Frage bezieht, ob etwas im Lichte aller diskutierten Gründe Zustimmung verdient oder nicht. Akzeptanz und Akzeptabilität können konvergieren oder divergieren“ (Röhlig u. a., 2014). Im Sinne von Akzeptabilität sind Aussagen demnach akzeptabel, wenn sie sich mit (möglichst guten) Gründen rechtfertigen lassen (Begründungsrationalität). Das regelgerechte Argumentieren ist die Quintessenz wissenschaftlicher Praxis.

¹ Zu den diesbzgl. Schwierigkeiten vgl. Brunnengräber u. Smeddinck (2016).

Argumente, die das regelgerechte Argumentieren tragen, bestehen generell aus einer Abfolge von Prämissen, die unter einer Schlussregel zu einer Konklusion führen. „Korrekt“ ist ein Argument dann, wenn aus den Prämissen die Konklusion logisch folgt; „gültig“ ist ein Argument, wenn darüber hinaus die Prämissen als wahr oder richtig angenommen werden. Alle gültigen Argumente sind auch korrekt, aber nicht umgekehrt. Argumente, deren Konklusion praktisch relevant ist, sich also auf Entscheidungen, Handlungen, Regelwerke usw. auswirken, müssen mindestens eine normative, auf Regeln oder Pflichten bezogene, oder axiologische, auf Werte bezogene, Prämisse enthalten, d. h. Prämissen, in denen Ausdrücke wie „sollen“, „gut“, „verpflichtet sein“ usw. auftauchen. Werden Konklusionen als Prämissen in neue Argumente eingefügt oder Prämissen bestritten, entstehen Argumentationen, die beliebig komplex werden können. Dem Ideal von Akzeptabilität gemäß ist die Bemühung, eine Argumentation aufzubauen, deren schlussendliche Konklusion eine Aussage über die beste Entsorgungsoption anstrebt. Dieses theoretische Ideal kann zwar nicht erreicht werden, die Bemühung bleibt dennoch sinnvoll. Es ist dann möglich, bestimmte hypothetische Argumentationen aufzubauen, die transparent machen, warum ein gültiges Argument entsteht, wenn man bestimmte Prämissen heranzieht oder bestimmte Kriterien stark gewichtet. Auf diese Weise können die im Rahmen von ENTRIA entwickelten Referenzmodelle (siehe Abschnitt 3.2.1) der drei betrachteten Entsorgungsoptionen hinsichtlich verschiedener Aspekte zueinander in Relation gesetzt werden, ohne eine absolute Bewertung vorzunehmen.

Über die Qualität bzw. die Güte von Gründen wird in Diskursen gestritten (Diskursrationalität gemäß Grunwald, Ott unter Rekurs auf Habermas (1992)). Die Qualität von Gründen, die mit Ausdrücken wie „triftig“, „überzeugend“, „(hoch)plausibel“, „zwingend“, „ausschlaggebend“, „robust“ usw. behauptet wird, ist nur für Teilnehmer eines Diskurses zu erkennen, da die verschiedenen Gründe und die hinter ihnen stehenden Annahmen aus der Argumentation der Beteiligten heraus wahrgenommen werden, und erschließt sich externen Diskursbeobachtern meist nicht oder nur unzureichend. Dies bedeutet, dass die Wissenschaft sich mit ihren Argumenten in den gesellschaftlichen und politischen Diskurs einbringen muss. Hilfreich kann dafür sein, Vertreter dieser Diskurse, insbesondere Stakeholder² und verantwortliche politische Akteure, wechselseitig in den wissenschaftlichen Diskurs einzubeziehen, um gesellschaft-

²Der Begriff Stakeholder wird hier im Sinne der Definition der NEA (2013) gebraucht: „Any actor – institution, group or individual – with an interest or a role to play in the radioactive waste management process“.

liche Aspekte in den wissenschaftlichen Diskurs einzubringen sowie wissenschaftlichen Begründungen für gesellschaftliche Akteure nachvollziehbar zu machen. Das Einbringen von Argumenten in den politischen Diskurs oder auch die Einbindung verantwortlicher politischer Akteure in den wissenschaftlichen Diskurs kann diesen eine robuste Grundlage für Entscheidungen zur Verfügung stellen und Begründungen liefern für den Prozess der Interessenaggregation, der vor Entscheidungen stattfindet und im günstigen Fall auf Beratungen fußt, in denen Argumente abgewogen werden. Diese Art integrativer Forschung geht über die traditionelle Reichweite wissenschaftlicher Projekte hinaus.

In einem ersten Schritt ist das Spektrum der Optionen darzustellen. Es kann durch externe Setzungen – die selbst wieder aus wissenschaftlichen Quellen gespeist sein können – vorgängig eingeschränkt werden oder aber dem Ideal der Vollständigkeit gemäß erfolgen. Wissenschaftlich gesehen darf ein Ausschluss von Optionen nicht auf externen Setzungen beruhen. Es kann jedoch pragmatisch sinnvoll sein, Optionen auszublenden, die *de lege lata* untersagt werden. Werden beispielsweise internationale Abkommen wie die London Dumping Convention oder der Antarktisvertrag als bindend anerkannt, so scheiden etliche in der Literatur diskutierte Optionen zur Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe aus. Dies ist eine normative Entscheidung. Die Beschäftigung mit den zugrundeliegenden Motiven für einen solchen Ausschluss stellt eine eigenständige Aufgabe dar.

Im Rahmen des wissenschaftlichen Diskurses ist eine Entsorgungsoption akzeptabel, wenn sie durch gut begründete Argumente gerechtfertigt werden kann. Die faktische Akzeptanz von bestimmten Argumenten für oder wider eine Entsorgungsoption ist zunächst nicht von Bedeutung. Wenn die Tiefenlagerung mit Monitoring und Rückholbarkeit heute unter den potenziell Betroffenen mehr Akzeptanz findet als die Endlagerung ohne solche Vorkehrungen, bleibt dies ohne Einfluss auf den sicherheitsgerichteten (oder anderweitigen) Vergleich der Optionen, es sei denn, dass mangelnde Akzeptanz ihrerseits zu Beeinträchtigungen der Sicherheit führt; zum Beispiel, weil sie gewalttätige Auseinandersetzungen begünstigt oder am potenziellen Standort einer Entsorgungsanlage zu sozialen Konflikten beiträgt.

4.5 Grundsätze

Praktische Argumente (s. o.) müssen normative Prämissen enthalten. Diese lassen sich auf Grundsätze (auch: Grundwerte, Prinzipien) zurückfüh-

ren. Grundsätze sind in ihrer abstrakten Allgemeinheit in der Regel unstrittig. Für ENTRIA lassen sich viele normative Gesichtspunkte auf zwei Grundsätze zurückführen: Sicherheit und Gerechtigkeit.

Der Grundsatz der Sicherheit gründet in den Rechten auf Leben und körperliche Unversehrtheit; der Grundsatz der Gerechtigkeit in Rechten auf politische Teilnahme, Rechtsschutz und in den Legitimitätsbedingungen politischer Entscheidungen. Diese Grundsätze sind sowohl in inter- und transdisziplinärer Perspektive wie auch gesellschaftlich konsentiert. Sie bedürfen jedoch der Spezifikation durch eine Unterscheidungspraxis, die zu Kriterien führt.

Gerechtigkeit beruht nach Höffe (1989) auf Tauschverhältnissen mit daran angebotenen korrektiven Formen. Zu den materiellen Formen von Vorteilen, die bei Gerechtigkeitsfragen verhandelt werden, gehören immer auch immaterielle Vorteile, die ebenfalls mit zu berücksichtigen sind. Diese immateriellen Bereiche berühren u. a. Fragen der Sicherheit, gesellschaftlicher Anerkennung und Freiheiten. Da es sich bei diesen Tauschverhältnissen nicht immer um positive Güter, sondern auch um negativ einschränkende, also Vorteile vermindern Güter handeln kann, sind Prozesse kollektiver Beratung und Abstimmung immer diskursive Räume, in denen Entscheidungen über negative Lasten wie der nuklearen Abfälle und Reststoffe eingebracht werden. Dieser Grundsatz der Gerechtigkeit gliedert sich nach der klassischen Einteilung des Aristoteles in a) politische, b) distributive und c) prozedurale Gerechtigkeit. Fragen der Rechtsstaatlichkeit, der Verbindlichkeit internationaler Abkommen und der demokratischen Legitimität können der Dimension der politischen Gerechtigkeit zugeordnet werden.

Distributive Gerechtigkeit betrifft die Verteilung von Lasten und möglichen Schäden, lebt aber auch von der Vorstellung, dass einseitige Lastenverteilungen kein plausibles Handlungsziel darstellen. Der nachvollziehbare Wunsch eines jeden Bürgers, keine Risiken von außen aufgebürdet zu bekommen, ist in der öffentlichen Debatte wirkmächtig. Unverhältnismäßige Risiken, die von einzelnen Individuen getragen werden müssten, sollten vermieden werden. Gleichfalls abzustimmen und bei positiver Resonanz zu verteilen sind Vorteile, dies kann z. B. die Aussicht auf die Schaffung von Arbeitsplätzen, die Entwicklung von Infrastruktur und die Förderung der Regionalentwicklung, die mit der Übernahme von Lasten einhergehen, umfassen. Auch Kompensationsleistungen sind im Rahmen eines Lastenausgleichs denkbar.

Die Frage nach Freiwilligkeit ist der distributiven Gerechtigkeit zuzuordnen, die nach angemessenen Formen der Partizipation der prozeduralen Gerechtigkeit. Die Debatte um Rechtsstaatlichkeit und Partizipation

(Smeddinck u. Roßegger, 2013) lässt sich als Frage nach der Gewichtung dieser Dimensionen der Gerechtigkeit rekonstruieren.

Politische Gerechtigkeit setzt in modernen Gesellschaften darauf, dass auf eingangs erfolgende Interessenartikulationen der verschiedenen beteiligten kollektiven Akteure im Anschluss Formen der Interessenaggregation gefunden werden, die die Handlungsalternativen mit ihren Gründen darstellen und diese den Stakeholdern und der interessierten Öffentlichkeit inklusive ihrer Folgen deutlich machen. In dieser Auseinandersetzung erhält die Wissenschaft eine besondere Rolle, die die des „Honest Brokers“ (Pielke, 2007) sein sollte.

Hinsichtlich der Entsorgungsproblematik muss die Frage nach Gerechtigkeit auch über Generationen hinweg gestellt werden. Diese Besonderheit geht einher mit der Schwierigkeit, Fragen der generationenübergreifende Gerechtigkeit angemessen zu berücksichtigen: Da uns Wertvorstellungen, Bedürfnisse und Wünsche nachfolgender Generationen unbekannt sind, bleibt eine diesbezügliche Bewertung auf Projektionen heutiger Vorstellungen in mögliche Zukünfte angewiesen. Andererseits kann mit Spaemann (2011) begründet werden, dass in jedem Fall Aspekte berücksichtigt werden müssen, die für die nächsten beiden Generationen relevant sind, da wir ihnen gegenüber deutlich konkretere Vorstellungen entwickeln als gegenüber weiter entfernten Generationen.

4.6 Schritte zur Kriteriologie

Kriterien sollen Unterschiede auf bestimmten Merkmalen sichtbar machen, deswegen dienen sie einer nachvollziehbaren und transparenten Urteilsbildung und dazu, Vorzüge und Nachteile bestimmter Optionen aufzuzeigen. Kriterien können qualitativ oder quantitativ sein. Bei quantitativen Kriterien ist zu unterscheiden, ob eine direkte Messung möglich ist oder nicht. Wenn nicht direkt gemessen werden kann, ist es sinnvoll, nach Indikatoren zu suchen. Diese sind gewissermaßen Proxies, stellvertretende Messungen für Informationen, die nicht direkt verfügbar sind. Neben dieser immanenten Präskriptivität von Kriterien sind diese auch angebunden an höherstufige Prinzipien, es sind gewissermaßen Differenzierungen, Spezifizierungen oder Konkretisierungen. Als höherstufige Prinzipien im Zusammenhang mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle müssen die Grundsätze Sicherheit und Gerechtigkeit angesehen werden.

Es ergibt sich eine baumartige Struktur: ein Grundsatz wird mit vielleicht vier bis fünf Kriterien unterlegt, die mit Unterkriterien ausgebaut

werden. Diese wiederum werden durch Messanweisungen oder Indikatoren näher bestimmt.

Unterschiedliche Akteure werden unterschiedliche Prinzipien, Oberkriterien usw. unterschiedlich gewichten. Das kann beispielsweise zur Betonung von Gerechtigkeitsaspekten unter Inkaufnahme von Sicherheitsdefiziten führen. Umgekehrt kann der Standpunkt vertreten werden, dass es in erster Linie auf Sicherheit ankommt, und selbst wenn der Prozess nicht ideal fair ist, Sicherheit höher als Fairness zu bewerten sei. In der Regel besteht Einigkeit darin, dass ein Kriterium ein Kriterium ist. Uneinigkeit besteht darüber, wie schwer ein Kriterium bei einer Urteilsbildung, bei einem Vergleich tatsächlich zu gewichten ist. In jedem Fall können mit einem guten Satz von Kriterien Urteile transparent und nachvollziehbar begründet werden.

Kriterien entstehen durch sukzessive Spezifikation der Grundsätze nach sachlichen Aspekten. Es ist zu unterscheiden zwischen absoluten Kriterien einerseits und (relativen) Vergleichskriterien andererseits. Nachfolgend wird davon ausgegangen, dass Kriterien einen Bezug zur Akzeptabilität herstellen (absolut oder relativ). In der Praxis existierende Kriterien entsprechen nicht notwendigerweise diesem Ideal. Auf der Ebene der Kriterienbildung und -bewertung vermehren sich die Dissenspotentiale deutlich.

Unter „Operationalisierung“ ist die Überführung eines qualitativen Kriteriums in eine Messanweisung zu verstehen (Hempel, 1954). Ist eine direkte Operationalisierung nicht möglich, so werden einem Kriterium bestimmte Indikatoren zugeordnet. Ein Indikator ist hierbei eine Größe, die einen Sachverhalt mehr oder minder genau charakterisiert und eine mittelbare Messung ermöglicht. Ein Kriterium für einen Optionenvergleich (Vergleichskriterium) kann demnach die Form haben: „Eine Option A gilt als diesbezüglich günstiger als eine Option B, wenn der Indikator X für A einen geringeren (bzw. höheren) Wert annimmt als für B.“ Vergleichskriterien sollen also insofern diskriminieren, als sie Unterschiede zwischen Optionen aufzeigen.

Ein spezifisches Problem stellt die Verbindung von Kriterien und Indikatoren mit Grenzwerten dar, die normativ festgelegt werden müssen. Zur Problematik der Grenzwerte, ihrer Festlegung und diesbezüglicher Kritiken vgl. Brunnengräber u. a. (2016) und Smeddinck u. König (2016). Die Zuordnung von Kriterien, Indikatoren und Grenzwerten zu Risiken und Ungewissheiten, d. h. zu Eintrittswahrscheinlichkeit, Schadensausmaßen und Verteilung stellt eine zusätzliche Komplikation dar. Wie wahrscheinlich ist es, dass im Laufe der Zeit ein Grenzwert überschritten wird

– und wie schlimm ist es? Die Verbindung von Wissenslücken und Risiken ist darzulegen.

Es ist möglich und zulässig, Kriterien unterschiedlich zu gewichten. Bei der Gewichtung von Kriterien dürften die unterschiedliche Gewichtung einzelner Aspekte der Grundsätze und die Einschätzung von Risiken stark relevant sein. Wer prozedurale Gerechtigkeit höher gewichtet als Sicherheit, könnte mit einer Lösung einverstanden sein, die unter einem Primat der Sicherheit defizitär sein könnte.

Systematisch betrachtet, darf die Beurteilung aller Optionen für den Umgang mit hoch radioaktiven Reststoffen erst im Anschluss an eine Kriterienbildung, d. h. nur kriteriologisch erfolgen. Dies betrifft auch alle von ENTRIA nicht vertieft betrachteten Optionen. So könnte bspw. ein Export von radioaktiven Reststoffen dem Grundsatz der Gerechtigkeit und den hieraus ableitbaren Kriterien von Eigenverantwortung widersprechen. Wenn die Raketentechnologie eine Hochrisikotechnologie ist, scheidet die Verbringung in den Weltraum als zu riskant aus. Insofern ist eine systematische Kriterienbildung eine Voraussetzung für den Umgang mit Entsorgungsoptionen, falls deren Ausschluss nicht bloß intuitiv oder mit Blick auf die Rechtslage erfolgen soll.

Eine Synthese bestünde in einem transparenten, kriteriologisch gestützten und diskursiv geprüften Optionenvergleich. Dieser schließt eine Risikoanalyse und letztendlich auch eine Betrachtung des notwendigen Aufwandes ein. Angesichts der Beschränktheit der Ressourcen und der Möglichkeit, einen marginalen Zugewinn an Sicherheit mit einem Kostensprung zu erkaufen, wäre es unredlich, vom finanziellen Aufwand einfach zu abstrahieren. Hier erfährt der Begriff der möglichst großen Sicherheit eine Präzisierung: Berücksichtigt man Randbedingungen von außen, gelangt man zur Forderung nach optimierter Sicherheit. So definiert beispielsweise die Internationale Strahlenschutzkommission (ICRP), allerdings ausschließlich mit Blick auf den Strahlenschutz: „Der Grundsatz der Optimierung wird von der Kommission als ein quellenbezogener Prozess definiert, der dazu dient, die Wahrscheinlichkeit von Expositionen (in Fällen, in denen diese nicht mit Sicherheit erhalten werden), die Zahl der exponierten Personen und die Höhe der individuellen Dosen so niedrig zu halten, wie es unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Faktoren vernünftigerweise möglich ist“ (BfS, 2009).

Die Kriteriologie nimmt das Ergebnis nicht vorweg, sondern ermöglicht es. Das Ergebnis kann eine bestmögliche Option identifizieren oder aber zum Ergebnis kommen, dass unterschiedliche Optionen unter unterschiedlichen Kriterien, die unterschiedlich gewichtet werden, unterschiedlich abschneiden. Dabei ist auf den umgangssprachlichen Ausdruck

bestmöglich zu reflektieren. Es kann sich um eine „first best solution“ handeln oder um ein Bestes, das wir meinen, wenn wir bspw. sagen: „Sie gehört sicher zu den weltbesten Geigerinnen“. Man kann sich einigen, wer zu den Besten zählt, ohne sagen zu müssen, wer der Allerbeste ist, weil man einsieht, dass die Frage nach dem Allerbesten unentscheidbar ist oder bleiben muss. Es ist nicht widersprüchlich, wenn sich mehr als genau eine bestmögliche Lösung herausstellen lässt. Um diese Problematik aufzulösen, spricht ENTRIA von einer möglichst sicheren Lösung. Dieses Problem besteht auch dann, wenn man die beste Einlagerung als das geringste Übel konzipiert. Den Begriff Übel operationalisierbar, objektivierbar und relativierbar zu gestalten, um ein geringstmögliches Übel zu identifizieren, stellt sich ungleich schwieriger heraus, als über ein möglichst geringes Übel zu diskutieren.

In § 1 Abs. 2 S. 2 StandAG wird rechtsverbindlich folgendes definiert: „Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ist der Standort, der im Zuge eines vergleichenden Verfahrens aus den in der jeweiligen Phase nach den hierfür maßgeblichen Anforderungen dieses Gesetzes geeigneten Standorten bestimmt wird und die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet. Dazu gehört auch die Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen.“

Juristisch ist weiter herausgearbeitet worden, dass der Grundsatz der bestmöglichen Gefahrenabwehr und Risikovorsorge eine Dynamisierung des Rechtsgüterschutzes fordert (Roßnagel u. Neuser, 2006, S. 125). Die Dynamisierung des Rechtsgüterschutzes bedeutet die Anpassung an neue fachliche oder technische Anforderungen, ohne dass zuvor die Rechtslage respektive das einschlägige Gesetz oder eine Verordnung geändert werden muss, indem stattdessen der Stand von Wissenschaft und Technik jeweils in der aktuellen Rechtsanwendungssituation bestimmt werden muss.

Bei der Planung einer kerntechnischen Anlage müssen unterschiedliche Szenarien berücksichtigt werden. Es sind verschiedene Störfälle denkbar, die zur Freisetzung von radioaktiven Stoffen führen würden, wenn die Anlage nicht gegen einen solchen Unfall ausgelegt wäre. Als auslegungs-überschreitende Störfälle werden Unfälle bezeichnet, bei denen stärkere Belastungen auftreten als beim Auslegungstörfall. Der Grundsatz der bestmöglichen Gefahrenabwehr und Risikovorsorge schließt auch im Hinblick auf den Stand von Wissenschaft und Technik die Risi-

kovorsorge gegen auslegungsüberschreitende Ereignisse in den Vorsorgetatbestand mit ein und gliedert ihn gerade nicht aus³.

4.7 Übergang zur Politik und die Frage der Akzeptanz

Wenn man unter strikter Beachtung des wissenschaftlichen Ethos' auf dem skizzierten Weg zu einem Ergebnis gelangt sein sollte, kann man auf die Unterscheidung von Akzeptanz und Akzeptabilität zurückkommen. Es geht dann (und erst dann!) darum, dass das Akzeptable auch faktisch akzeptiert wird. Über die Mittel, Akzeptanz zu befördern (persuasive Kampagnen), will ENTRIA nicht befinden. Einer Vermischung von Begründungs- und Bewertungsrationalität ist ENTRIA-intern und generell entgegenzutreten. Um naheliegende Missverständnisse zu vermeiden: Das Problemfeld von Freiwilligkeit und Kompensation gehört in die Dimension der distributiven Gerechtigkeit, nicht in die der Akzeptanz.

Eine Entscheidung kann aus Gründen der politischen Gerechtigkeit und der rechtsstaatlichen Ordnung nur im politischen System erfolgen. Allerdings werden Vertreter des politischen Systems begründungspflichtig gegenüber der politischen Öffentlichkeit, falls sie von den Ergebnissen eines Optionenvergleichs abweichen. Auf diese Weise werden beispielsweise die von der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Reststoffe vorgenommenen bewertenden Einstufungen von Optionen in Kategorien in diesem System entscheidungsrelevant.

Während der Bearbeitungszeit des Vorhabens ENTRIA hat sich die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe mit der Frage der Entsorgungsoptionen befasst und ist in ihrem Abschlussbericht (Endlagerkommission, 2016) zu der Empfehlung einer „Endlagerung mit Reversibilität“ gelangt. Die Forschung im Vorhaben ENTRIA erfolgte unabhängig von der Kommissionsarbeit. Die Kommission als Teil des politischen Systems war nicht dem Leitcode wissenschaftlichen Arbeitens unterworfen (s.o.). Die im Vorhaben ENTRIA engagierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sehen daher ihre Arbeit und ihre Ergebnisse als einen zum Abschlussbericht der Kommission komplementären Beitrag zur „Prozessgestaltung als selbsthinterfragendes System“, wie sie das Standortauswahlgesetz vorsieht.

³BVerwG, Urt. v. 10.11.2008, 7 C 39.07, Rn. 32

4.8 Operationalisierung der Bewertungsgrundlagen

Wie oben ausgeführt bestehen die ersten Schritte zur Entwicklung einer Kriteriologie in der Sammlung und Zuordnung der gewonnenen Ergebnisse. Allerdings ist diese Zuordnung nicht unbedingt eindeutig: So besitzt das Kriterium „Unkontrollierte Freisetzung von Schadstoffen und Radionukliden in sensible Ökosysteme“, mit dem sich der Ausschluss vieler alternativer Vorschläge von Entsorgungskonzepten begründen lässt, eine offensichtliche Sicherheitskomponente.

Der Grundsatz der Sicherheit gliedert sich in die Frage nach Angriffssicherheit („security“) und Anlagensicherheit („safety“). In diesen beiden Unterpunkten der Sicherheits-Dimension müssen die Fragen nach 1) betroffenen Personen und nach Schutzgütern, 2) nach den Arten und Ursachen von Gefährdungen und 3) nach den Phasen des Entsorgungsprozesses gestellt werden. Die Betrachtung der Zeitdimension ist ein Spezifikum des Entsorgungspfades für radioaktive Abfälle.

Hinsichtlich 1) muss weiter differenziert werden nach der Art der Betroffenheit (Beschäftigte, Anwohner, „unintentionally intruding humans“ usw.) und dem Rang von unterschiedlichen Schutzgütern (Leben, Gesundheit, Grundwasser, Natur, Landschaft usw.). Hinsichtlich 2) kann z. B. unterschieden werden in durch menschliches Verhalten verursachte Gefährdungen und solche, die aus physikalischen und chemischen Prozessen resultieren. Gefahren können z. B. in Zusammenhang mit Direktstrahlung, dem radio- und chemotoxischen Potential oder dem Kritikalitätspotential der einzulagernden Stoffe sowie der Errichtung und dem Betrieb eines Lagers und deren Folgen entstehen. Punkt 3) umfasst die sich teilweise überlappenden Phasen Zwischenlagerung, Errichtung eines Lagers, Anlieferung, Konditionierung, Einlagerung, Lager- bzw. Offenhaltungsbetrieb, Verschluss, Rückbau, Nachverschlussphase sowie möglicherweise vor Verschluss und Rückbau eine Rückholung, Neukonditionierung und weitere Maßnahmen. Nicht alle Kombinationen der unter 1), 2) und 3) aufgeführten Aspekte sind sinnvoll.

Der Grundsatz Sicherheit bedarf also einer vertieften Analyse und anschließenden Aggregation in einen Risikobegriff. Dieser beinhaltet die Beschreibung potentiell gefährlicher Situationen, in denen ein Schaden mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eintreten kann. Wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit und das Ausmaß eines Schadens (vgl. Abschnitt 3.4.3) abgeschätzt werden können, so ist das Risiko kalkulierbar. Ungewissheit muss dann als Mangel an Wissen definiert werden, der eine Risikoeinschätzung erschwert oder verunmöglicht.

Analysen zur Sicherheit umfassen Risikoabschätzungen, die wiederum immer mit Ungewissheiten einhergehen. Ungewissheiten können sich dergestalt auswirken, dass Risikoabschätzungen nicht mehr belastbar sind. Kriterien müssen diese Aspekte ebenso wie die Robustheit und Resilienz von Entsorgungsoptionen gegenüber Ungewissheiten berücksichtigen. Dazu gehört auch eine ausreichende Vorstellung von den Tücken des Nichtwissens, das bei der Reflexion von Risikoabschätzungen zu berücksichtigen ist.

4.9 Entsorgungsoptionen, Bewertungsgrundlagen und Architektonik

Zur Zeit der Antragsphase des Vorhabens ENTRIA (bis 2012) war für die in Deutschland angefallenen hoch radioaktiven Reststoffe durch die Sicherheitsanforderungen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2010) der Entsorgungsweg einer Endlagerung in tiefen geologischen Formationen mit Rückholbarkeit während der Betriebsphase sowie gewissen Vorkehrungen zur Erleichterung einer möglichen Bergung vorgezeichnet. Diese Elemente der Reversibilität (Rückholbarkeit, Erleichterung einer Bergung) stellten 2010 ein Novum in der deutschen Entsorgungsstrategie dar: bis dahin waren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf Endlagerung ohne solche Vorkehrungen gerichtet. Die ENTRIA-Antragsphase war von der Beobachtung geprägt, dass die in der Politik, in den Medien, aber auch von Wissenschaftlern geführten Diskussionen um Entsorgungsoptionen solche Vorzeichnungen oder Festlegungen durch Forschung, Entwicklung und Sicherheitsanforderungen in Frage stellten.

Aus dieser Beobachtung heraus wurde die Idee entwickelt, die drei Entsorgungsoptionen

- Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit,
- Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit und
- Oberflächenlagerung

disziplinären und interdisziplinären Analysen zu unterziehen.

Diese drei Optionen wurden in dem Bewusstsein ausgewählt, dass in der Diskussion zur Entsorgung durchaus weitere Optionen eine Rolle spielen, vgl. etwa die von Nirex (2002) vorgenommene Zusammenstellung.

Grundlage der Auswahl dieser drei Optionen (und damit des Ausschlusses weiterer Optionen) war die Intention, sich auf Optionen mit existierenden technischen Konzepten zu beschränken. Andere Optionen (z. B. Abtrennung und Transmutation, aber auch so genannte exotische Optionen wie eine Verbringung in Subduktionszonen oder in den Weltraum) konnten aufgrund rechtlicher oder sicherheitsgerichteter Überlegungen oder aufgrund ihres technischen Entwicklungsstandes ausgeschlossen werden: Eine Option, die über einen Zeitraum von Jahrzehnten und mehr technisch zu entwickeln ist, setzt zunächst die Implementierung einer längerfristigen Zwischenlagerung (und damit zumindest vorübergehend die Wahl einer der drei ENTRIA-Optionen) voraus. Die Frage, ob die Wahl der genannten Optionen der Problematik angemessen ist und welche ihrer Ausgestaltungen zu betrachten sind, wurde während des Vorhabens kontinuierlich im interdisziplinären Diskurs thematisiert und erörtert, vgl. hierzu u. a. Appel u. a. (2015) sowie Kap. 3.2.

Die Option Oberflächenlagerung nimmt eine Sonderstellung ein: Oberflächenlagerung ist zwar prinzipiell auch für unbegrenzte Zeiträume und damit als scheinbar endgültige Entsorgungslösung denkbar (Hütekonzzept), existierende bzw. bislang systematisch untersuchte technische Konzepte erstrecken sich jedoch auf Lagerzeiträume über Jahrzehnte bis hin zu wenigen Jahrhunderten (vgl. Kapitel 5.7). Unter dieser Voraussetzung ist die Oberflächenlagerung nicht eine endgültige Lösung, sondern eine Maßnahme mit der Intention der Rückholung, also zur Aufbewahrung oder Zwischenlagerung (storage im Sinne des Glossars der International Atomic Energy Agency (2007)). Die in ENTRIA betrachtete Oberflächenlagerung über Zeiträume über die bislang geplanten hinaus kann aus zwei Gründen von Interesse sein (vgl. Abschnitt 3.8.6):

1. als Vorstufe zu einer Tiefenlagerung oder Endlagerung, weil deren Implementierung mehr Zeit in Anspruch nimmt als bislang geplant, oder
2. als Vorstufe zu einer bislang noch nicht bekannten Entsorgungslösung.

Im ersten Fall handelt es sich bei den längeren Lagerzeiten um einen notwendigen bzw. äußeren Zwängen geschuldeten Umstand, im zweiten Fall um einen bewusst herbeigeführten Zustand. Für die damit in Zusammenhang stehenden technischen Überlegungen mag dies von geringer Bedeutung sein, die beiden Gründe ordnen sich jedoch in das im ENTRIA-Memorandum (Röhlig u. a., 2014) benannte Spannungsfeld zwischen einer „Strategie des Aufschiebens“ und dem „Vorantreiben einer Entsorgungsoption“ ein. Im Falle des Aufschiebens („buying time“) stellt

sich die Frage nach einem „optimal stopping point“ (vgl. Abschnitt 5.3.1): Wann versprechen nochmalige Überprüfungen oder Diskurse keine Gewinne mehr?

Eine Parallele zur von der Kommission ausgesprochenen Empfehlung einer Etappe 4: Beobachtung vor Verschluss des Endlagerbergwerks (im Vorhaben ENTRIA: Offenhaltungsphase) ist die Untersuchung zu diesbezüglichen Möglichkeiten und Zeiträumen im Vertikalprojekt 6 (vgl. Kap. 5.6.2). Sollte es zu einer solchen Etappe kommen, ist zu unterscheiden, ob eine Strategie des Aufschiebens oder ein Vorantreiben einer Entsorgungsoption intendiert ist. Dazu hilft die Beantwortung der folgenden Fragen (vgl. Abschnitt 5.3.1):

Soll der Ablauf hin zu einer Entsorgungslösung gezielt verzögert werden? Warum bzw. wofür? Wann und mit welchen Maßnahmen? Welche Trade-Offs sollen dazu in Kauf genommen werden?

Im Vorhaben ENTRIA wurde entschieden, Bewertungsgrundlagen unter den Aspekten Sicherheit (einschließlich Sicherung) und Gerechtigkeit zu betrachten. Alle Vertikalprojekte befassten sich mit Fragen der Sicherheit, in Transversalprojekt 4 erfolgte eine integrierende Bewertung zu Sicherheit, Risiken und Ungewissheiten. Transversalprojekt 3 widmete sich vor allem der differenzierten Analyse von Gerechtigkeit und Freiwilligkeit. Beide Aspekte sind miteinander verknüpft: So betreffen zum Beispiel die Fragen nach der Zumutbarkeit oder Akzeptabilität von Risiken oder nach deren „Verteilung“ (zwischen Bevölkerungsgruppen, zwischen Generationen) sowohl Aspekte der Sicherheit als auch der Gerechtigkeit.

Im Hinblick auf Untersuchungen zur Sicherheit war es zunächst notwendig, analog zur externen Kohärenz (Grunwald, 2016) auch eine projektinterne Konsistenz anzustreben. Die entsprechenden Arbeiten und Verabredungen zu Referenzkonzepten und -modellen, Szenarien, Rechenfällen usw. sind in Abschnitt 3.2 dargestellt. Die Nutzung solcher Verabredungen impliziert zugleich, dass die betreffenden Arbeiten einen exemplarischen Charakter erhalten. Ergebnisse und Schlussfolgerungen sind nicht allgemeingültig, sondern gelten unter den jeweiligen Voraussetzungen. Dies gilt jedoch nicht nur für das Vorhaben ENTRIA: So wird zum Beispiel die Nutzung von Sicherheitsuntersuchungen für Vergleiche im Standortauswahlverfahren an die diesen zugrunde gelegten Sicherheits- und Endlagerkonzepte gebunden sein. Andere Konzepte könnten – so vorhanden – theoretisch auch zu anderen Vergleichsergebnissen führen. Es wäre jedoch nicht praktikabel, diesbezüglich beliebig viele Freiheitsgrade zuzulassen: Der Entwicklungs- und Untersuchungsaufwand wäre nicht mehr leistbar, gleichzeitig würde keine wesentliche Verbesserung bezüg-

lich des Verfahrens herbeigeführt. Vielmehr ist es sinnvoll, die Konzepte in einem schrittweisen, lernenden Verfahren weiterzuentwickeln.

Die auf den Aspekt der Sicherheit bezogenen Arbeiten zu Bewertungsgrundlagen umfassten die Erforschung wissenschaftlich-technischer Grundlagen und die Entwicklung von Methoden und Werkzeugen für Sicherheitsanalysen und -bewertungen sowie Vergleiche ausgewählter Aspekte insbesondere für die Tiefen- bzw. Endlageroption anhand der Referenzmodelle. Auf diese wird nachfolgend verwiesen, ein expliziter Verweis auf ebenfalls sicherheitsrelevante technische Entwicklungen (etwa zu Behälter- oder Monitoringkonzepten) erfolgt an dieser Stelle jedoch nicht. Im Vertikalprojekt 4 erfolgten darüber hinaus umfassende Untersuchungen zu Risiken (s. u.).

Dem Aspekt der Sicherheit kann sich auf unterschiedliche Weise genähert werden, z. B. durch

- Betrachtung der unterschiedlichen Schutzgüter,
- Betrachtung der unterschiedlichen Kontexte und Ursachen, aus denen Risiken oder Gefährdungen erwachsen können (z. B. aus Veränderungen der menschlichen Gesellschaft oder aus geologischen Vorgängen),
- Unterscheidungen nach dem Typ von Unsicherheiten und Ungewissheiten, die solche Risiken oder Gefährdungen betreffen (z. B. die Unterscheidung von kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten),
- Unterscheidung im Hinblick auf unterschiedliche Risikoansichten (Marti, 2016).

Angesichts der für die Entsorgung relevanten Zeiträume ist darüber hinaus eine Differenzierung nach Zeitabschnitten notwendig.

Die im Folgenden skizzierte Architektonik bietet Ansatzpunkte für die Einordnung verschiedener Kriterien. Die hier gewählte baumartige Struktur soll nicht darüber hinwegtäuschen, dass teilweise Verknüpfungen zwischen den einzelnen Ebenen vorhanden sind, und eine eindeutige Zuordnung eines Kriteriums zu einem bestimmten Blatt dieses Baumes nicht immer möglich ist. Die Verästeltiefe ist auch für unterschiedliche Bereiche unterschiedlich stark ausgeprägt. Wie bereits angeführt, bildet die Einteilung nach Sicherheit und Gerechtigkeit die Grundlage der Architektonik.

Aspekte der Sicherheit bilden die Grundlagen für die konzeptionelle Ausgestaltung der Entsorgungsoptionen. Ein dazugehöriges technisches

Konzept bildet den Kontext für eine interne Konsistenz, um mögliche gedanklichen Zusammenhänge zwischen einzelnen Disziplinen herzustellen. Im ENTRIA-Projekt wurde mit Referenzmodellen gearbeitet – im Wissen, dass die Betrachtung damit einen exemplarischen Charakter erhält. So erfordert z. B. eine Beantwortung der Frage nach den sicherheitlichen Auswirkungen des Vorhandenseins oder Fehlens einer Monitoringstrecke in einem Tiefenlager, dass weitere Randbedingungen fixiert werden.

Sicherheit fächert sich auf in die Kategorien Angriffssicherheit („security“) und Anlagensicherheit („safety“). Während bei der Angriffssicherheit Fragen von Sicherungsmaßnahmen, Zugriffssicherheit und im nuklearen Bereich Nichtproliferationsmaßnahmen den Kontext vorgeben, gilt es bei der Anlagensicherheit Mensch und Umwelt vor den gefährlichen Auswirkungen der Anlage zu schützen. Ökologische Sicherheit wird durch die Einhaltung der Schutzziele aus dem Umweltrecht gewährleistet, wie dem Immissionsschutz, der Einwirkungen auf Mensch, Flora und Fauna, und entsprechend dieser Ziele bewertet. Weitere Schutzgüter wie Boden, Wasser, Luft, Klima, Landschaft sowie Kulturgüter und sonstige Sachgüter können in Betracht gezogen werden. Soll bewertet werden, wie sich eine Anlage auf die Menschen auswirkt, sind dies vor allem Fragen nach dem Gesundheitsschutz. Zu beachten sind u. a. das radiologische Risiko, die chemotoxische Gefahren und die Betriebssicherheit, die der Verhinderung von Arbeitsunfällen dient.

Je nachdem wie weit man den Rahmen für den Gesundheitsschutz zieht, stellen sich auch Fragen nach dem Erhalt an Lebensqualität, wie sie u. a. im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen bewertet werden. Zum Vergleich der Krankheitslasten verschiedener Risikofaktoren werden für die gesundheitspolitische Entscheidungsfindung Indikatoren wie Years of Life Lost (YLL), Years Lost Due to Disability (YLD) und Disability / Quality Adjusted Life Years (DALY/QALY) verwendet. Diese werden für die Bewertung von Entsorgungsoptionen bislang nicht zu Rate gezogen⁴. Möglicherweise suggeriert ein solches Vorgehen eine Scheinobjektivität, da Werteentscheidungen in Formeln abgebildet werden. Die beiden Punkte Sicherheit der Umwelt und Sicherheit der Gesundheit sind auf das Ziel einer Entsorgungsoption gerichtet, hieraus lassen sich Leitge-

⁴Grundlage für eine radiologische Risikobewertung bildet das Detriment, der gesamte Gesundheitsschaden einer Person aus einer exponierten Gruppe und deren Nachkommen als Folge der Exposition der Gruppe durch eine Strahlenquelle. Detriment ist ein multidimensionaler Begriff. Seine Hauptbestandteile sind stochastische Effekte: Wahrscheinlichkeit für attributable Krebsmortalität, gewichtete Wahrscheinlichkeit für attributable Krebserkrankungen ohne Todesfolge, gewichtete Wahrscheinlichkeit für schwerwiegende vererbare Defekte oder vererbare Erkrankungen und Verlust an Lebenszeit, wenn der Schaden eintritt (ICRP, 2007).

danken für die Ausgestaltung, also das Sicherheitskonzept, ableiten, wie z. B. Konzentrieren und Einschließen der radioaktiven Abfallstoffe, Isolation von der Biosphäre, Ver- bzw. Behinderung der Migration von Fluiden. Im Langzeitsicherheitsnachweis (Safety Case) werden diese Aspekte anhand von Verhaltensindikatoren (performance indicators) bewertet. Dies können Zustandsgrößen der Barrieren (z. B. Schwellldrücke, Spannungsfelder), Fluid- oder Schadstoffströme oder Schadstoffkonzentrationen sein.

Technische Sicherheit ist nur mittelbar mit dem Schutz des Menschen verknüpft, sie ist zweckgerichtet und am Entsorgungskonzept ausgerichtet. Neben die Nachweise⁵ des konstruktiven Ingenieurbaus wie Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit, Dichtigkeit und Herstellbarkeit, treten Anforderungen aus der Geotechnik, wie die mechanische Stabilität untertägiger Bauwerke, der Schutz vor Bergschäden, und die Besonderheiten des Umgangs mit radioaktiven Stoffen, die Kritikalitätssicherheit und die Abfuhr der Zerfallswärme. Je nach Sicherheitskonzept werden den Komponenten des Lagersystems (Abfallmatrix, Behälter, Verfüllung / Puffer, Verschlussbauwerke, geologische Barrieren bzw. Oberflächenlager-Bauwerke) unterschiedliche Rollen bzw. Sicherheitsfunktionen zugewiesen.

Der Sicherheitsaspekt beinhaltet auch eine langfristige Planungskomponente. Die angestrebte Lebensdauer von bautechnischen Komponenten kann durchaus über 100 Jahre hinaus betragen. Zum Erhalt der Gebrauchstauglichkeit der Bauwerke benötigt man Aufsicht, Monitoring und Wartung und ein geeignetes Life-Cycle-Engineering. Für eine Rückholungsstrategie, die diese Zeitdauer abdeckt, sind Strategien zum Wissenserhalt und Wissensmanagement nötig. Es besteht aber das Risiko der Vernachlässigung oder Aufgabe der Anlage, hier stellt sich die Frage nach (gesellschaftlichen) Unsicherheiten.

Der Grundsatz der Gerechtigkeit umfasst Aspekte, die unter den Begriff Fairness fallen (Riemann, 2015). Die Aristoteles'schen Dimensionen der Gerechtigkeit lassen sich auflgliedern: Politische Gerechtigkeit umfasst die gesellschaftlichen, faktischen und implizit anerkannten Werte und Normen, theoretische Setzungen wie Gerechtigkeits- und Nachhaltigkeitspostulate, Leitgedanken aus der Umweltgesetzgebung wie Vorsorge-, Verursacher-, Kooperations- und Integrationsprinzipien, die politische Einbindung von Stakeholdern in die Entscheidungsprozesse sowie die Berücksichtigung inter- und supranationaler Vorgaben.

⁵Es wird von einer Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauwerks von 10^{-4} bezogen auf die Nutzungsdauer ausgegangen, für kerntechnische Anlagen wird ein strengeres Sicherheitskonzept verfolgt.

Prozedurale Gerechtigkeit beschäftigt sich mit den Voraussetzungen für gerechte Prozesse. Hier sind das Maß an Beteiligung, das Maß an Freiwilligkeit, die Nutzung fairer Verfahren als Voraussetzungen für Akzeptabilität anzulegende Messlatten. Die Wahl einer Risikostrategie (Risiko-scheu, Risiko-neutral, Risiko-suchend) kann z. B. über eine Minimax-Strategie abgebildet werden. Diese Strategie ist in einem intelligenten Zweipersonennullsummenspiel optimal, deren Einsatz lässt sich aber auch mit dem Argument „Man verhält sich so, als ob sich die Natur gegen einen verschworen hat“ für das Handeln unter Prognoseungewissheit einsetzen.

Distributive Gerechtigkeit bezieht sich auf die Allokation und Distribution von Gütern. Man kann räumliche Komponenten (z. B. zentrale und dezentrale Lagerung) und zeitliche Komponenten (nahe / ferne Zukunft, Kindeskindergeneration) identifizieren. Da es sich bei den Gütern auch um Übel handeln kann, die negativ zu bewerteten sind, können Kompensationen einen Ausgleich ermöglichen. Kosten und Aufwand müssen abgeschätzt werden, auch von Lasten, die durch die Vernachlässigung oder Aufgabe der Anlage entstehen könnten. Betroffenheit und Ängste sollten berücksichtigt werden. Die Auswirkungen von Transporten und der Re-Konditionierung der Abfälle ist ein weiterer Punkt der Verteilungsgerechtigkeit. Das Ergebnis eines als fair empfundenen Verfahrens dient als Voraussetzung für Akzeptanz.

4.10 Beiträge des Vorhabens ENTRIA zu den Bewertungsgrundlagen

Das in Diskussionen am häufigsten explizit oder implizit benannte Schutzgut ist die Gesundheit und Unversehrtheit des Menschen, insbesondere im Hinblick auf radiologische Belastungen. Entsprechend waren die Arbeiten zu Sicherheitsfragen im Vorhaben ENTRIA insbesondere auf diesen Aspekt gerichtet.

Für die Phasen des Betriebs von Tiefen- bzw. Endlagern und einer etwaigen Rückholung erfolgten Untersuchungen in den Arbeitspaketen 4.2 und 4.5. Für die Phase nach Verschluss des End- bzw. Tiefenlagers erfolgten Untersuchungen zu Barrierewirksamkeiten (AP 5.1, 5.2, 5.3) sowie zu Freisetzungsmechanismen (AP 4.4). In einer vergleichenden Risikobewertung der Optionen (AP 4.3, vgl. Abschnitte 3.4.2, 5.4.1 sowie Eckhardt (2018)) wurde die Entwicklung von kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten über die zu berücksichtigenden Zeiträume für die Referenzmodelle untersucht und in einer Risikokarte dargestellt. Damit wurde eine Darstel-

lungsform gewählt, die für Entscheidungsträger, insbesondere Politikerinnen und Politiker, und Vertreter der interessierten Öffentlichkeit aussagekräftig sein soll. In die Betrachtung flossen zudem Risikoansichten unterschiedlicher Akteure ein (Marti, 2016).

Mit Hilfe einer Analyse von Sicherheitsfunktionen und ihrer jeweiligen Robustheiten wurden Stärken und Schwächen der Referenzmodelle ermittelt, die in die vergleichende Risikobewertung eingingen. Darüber hinaus erfolgte die Entwicklung von wissenschaftlichen Grundlagen, Werkzeugen und Methoden, die in Risikobewertungen insbesondere in der Phase nach Verschluss von End- oder Tiefenlagern zur Anwendung kommen können (AP 4.1, 4.6, 5.1, 5.2, 5.3, vgl. Abschnitte 5.4.6 und 5.4.5 sowie Kapitel 5.5). In Anwendung solcher Werkzeuge wurden numerische Analysen fluiddynamisch relevanter Prozesse für End- bzw. Tiefenlager (ohne bzw. mit Überwachungssohle) in Tonstein- und in Steinsalzformationen sowie das resultierende Migrationsverhalten von Radionukliden exemplarisch für die Referenzmodelle numerisch simuliert (VP 5, Kap. 5.5 sowie Abschnitt 5.6.4).

In VP 6 wurden Endlagerkonzepte mit Rückholbarkeit geotechnisch bewertet (Abschnitt 5.6.2). Insbesondere wurden anhand gebirgsmechanisch-geotechnischer sowie thermischer Betrachtungen Randbedingungen einer sicheren Rückholbarkeit der Abfallgebinde aus dem Tiefenlager abgeleitet und Trade-Offs bezüglich des Barrierenverhaltens und damit der radiologischen Sicherheit identifiziert. Die im Vorhaben ENTRIA untersuchte Offenhaltungsphase entspricht der von der Endlagerkommission vorgeschlagenen „Etappe 4: Beobachtung vor Verschluss des Endlagerbergwerks“ (s. o.). Entscheidungsrelevant sind in diesem Zusammenhang die Zeiträume, über die eine solche Phase aus sicherheitstechnischer Sicht vertretbar ist, vgl. hierzu die Ausführungen in Abschnitt 5.6.2 zum Life-Cycle-Engineering.

Ebenfalls entscheidungsrelevant sind die Zeiträume, über die Oberflächenlagerung sinnvoll und sicherheitstechnisch vertretbar ist, vgl. hierzu Abschnitt 5.7.3 (AP 7.2). Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob und in welcher Weise die der Oberflächenlagerung zugrunde liegenden Mehrbarrierensysteme durch eine robustere Gestaltung der Bauwerke zu stärken sind (AP 7.1, Abschnitt 5.7.2). Gleiches gilt für Konditionierungsanlagen (AP 7.3, Abschnitt 5.7.4).

In TP 3 wurden Elemente der Optionen im Hinblick auf verschiedene Gerechtigkeitskategorien (Prozessqualität, Verteilung, Bereitwilligkeit, s. Abschnitt 3.8.2) analysiert und in eine umfassende Entsorgungsstrategie eingeordnet und bewertet (vgl. Abschnitte 3.8.7 und 5.3.1, zur zentralen Frage der Generationengerechtigkeit, 3.8.5). Aufschlussreich, wenn auch

nicht notwendigerweise repräsentativ sind diesbezüglich die Ergebnisse des in TP 3 mit Unterstützung durch die Mitarbeiter anderer Transversal- und Vertikalprojekte durchgeführten Bürgerforums sowie der Delphi-Studie (Abschnitt 5.3.1). Diese Aspekte sind auch im Hinblick auf eine künftige mögliche Ausrichtung transdisziplinärer Forschung relevant.

Eine wie auch immer geartete Aggregation der genannten Untersuchungen und Ergebnisse verbietet sich aus mehreren Gründen: (i) Es ist weder sinnvoll noch machbar, die sehr unterschiedlichen und interagierenden Aspekte der Grundsätze Sicherheit und Gerechtigkeit formal zusammenzuführen – jeder muss für sich genommen verstanden und gewürdigt werden. (ii) Viele Untersuchungen, insbesondere zu Sicherheitsfragen, sind aus praktischen und Kapazitätsgründen lediglich exemplarisch. (iii) Nicht alle Aspekte wurden behandelt (s. o.).

Ein Vergleich zwischen Tiefen- bzw. Endlagerung einerseits und Oberflächenlagerung andererseits hat konzeptionelle Grenzen: Im Hinblick auf Sicherheit ist dies insbesondere in der Dominanz der Ungewissheiten für die Oberflächenlagerung bei der Betrachtung von Zeiträumen jenseits des geplanten Betriebs begründet (Eckhardt, 2018). Der Umgang mit nicht abschätzbaren Risiken führt den Untersuchungen zu Risikoansichten (Marti, 2016) zufolge im gesellschaftlichen Diskurs vielfach zu Konflikten. Diese Konflikte könnten entschärft werden, wenn der Anteil kalkulierbarer Risiken bei einer Entsorgungsoption hoch und der Anteil an Ungewissheiten gering ist. Auch im Hinblick auf Fragen der Gerechtigkeit nimmt die Oberflächenlagerung eine Sonderstellung ein, vgl. hierzu sowie zur Einordnung der Oberflächenlagerung in eine Entsorgungsstrategie Abschnitt 3.8.6.

Jenseits einer vergleichenden Bewertung von Optionen zeigt sich, dass Elemente aller drei Optionen Komponenten einer langfristigen Strategie sein können, an deren Ende ein verschleißbares bzw. zu verschleißendes Tiefenlager steht. Dies gilt auch für die von der Endlagerkommission empfohlene Strategie hin zum „Endlagerbergwerk mit Reversibilität“ (s. auch Abschnitt 5.3.1).

Literatur

[Appel u. a. 2015] Appel, Detlef; Kreusch, Jürgen; Neumann, Wolfgang: Darstellung von Entsorgungsoptionen. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2015 (1) – ENTRIA Arbeitsbericht

- [Brunnengräber u. a. 2016] Brunnengräber, Achim; Hocke, Peter; Kalmbach, Karena; König, Claudia; Röhlig, Klaus-Jürgen; Kuppler, Sophie; Smeddinck, Ulrich; Walther, Clemens: Grenzwerte beim Umgang mit radioaktiven Reststoffen. Arbeitsbericht des ENTRIA-Transversalprojekts 2 (Überarbeitete Version). 2016 (1) – Interner Bericht
- [Brunnengräber u. Smeddinck 2016] Brunnengräber, Achim; Smeddinck, Ulrich: Möglichkeiten und Grenzen der Vereinheitlichung wissenschaftlicher Begriffe in der interdisziplinären Zusammenarbeit. Eine politik- und rechtswissenschaftliche Auseinandersetzung. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>. In: (Smeddinck u. a., 2016), 67–76
- [BfS 2009] Bundesamt für Strahlenschutz: Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 2007. 2009 (BfS-SCHR-47/09) – BfS-Schriften – ICRP-Veröffentlichung 103. Deutsche Ausgabe
- [Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2010] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin, September 2010 – Forschungsbericht – 22 S.
- [Chaudry u. Plischke 2016] Chaudry, Saleem; Plischke, Elmar: Wissenschaftliche Synthese bei der Forschung zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe in der Forschungsplattform ENTRIA. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>. In: (Smeddinck u. a., 2016), 121–128
- [Eckhardt 2018] Eckhardt, Anne: Vergleichende Risikobewertung von Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2018 – ENTRIA Arbeitsbericht – In Vorbereitung.
- [Endlagerkommission 2016] Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Hrsg.). Deutscher Bundestag: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Verantwortung für die Zukunft: Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes / Deutscher Bundestag. Berlin, 2016 (18/9100) – Bundestagsdrucksache – 684 S.

- [Grunwald 2016] Grunwald, Armin: Wissensintegration auf dem Weg zur Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>. In: (Smeddinck u.a., 2016), 111–119
- [Habermas 1992] Habermas, Jürgen: *Faktizität und Geltung. Beiträge zur Diskurstheorie des Rechts und des demokratischen Rechtsstaats*. 1. Aufl. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1992
- [Hempel 1954] Hempel, Carl G.: A logical Appraisal of Operationism. In: *The Scientific Monthly* 79 (1954), Nr. 4, S. 215–220
- [Höffe 1989] Höffe, Otfried: *Politische Gerechtigkeit*. Frankfurt/M., 1989
- [ICRP 2007] Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. In: *Annals of the ICRP* (2007)
- [International Atomic Energy Agency 2007] International Atomic Energy Agency (Hrsg.): *IAEA safety glossary: terminology used in nuclear safety and radiation protection*. Wien: International Atomic Energy Agency, 2007 <http://www-ns.iaea.org/standards/safety-glossary.asp?s=11&l=87>
- [Luhmann 1987] Luhmann, Niklas: *Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1987
- [Marti 2016] Marti, Michèle: Risikoansichten. Wie Merkmale der Person, der Quelle und des Rahmens die Art und Weise beeinflussen, wie Personen die mit der Entsorgung von radioaktiven Abfällen verbundenen Risiken wahrnehmen und bewerten. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2016 (5) – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Merton 1938] Merton, Robert K.: Science and the social order. In: *Philosophy of Science* 5 (1938), Nr. 3, S. 321–337
- [Nirex 2002] Nirex: Description of Long-term Management Options for Radioactive Waste Investigated Internationally. 2002 (N/050) – Nirex Report
- [NEA 2013] OECD Nuclear Energy Agency: Stakeholder Confidence in Radioactive Waste Management. An Annotated Glossary of Key Terms / OECD/NEA Publishing. Paris, 2013 (6988) – report

- [Ott 1997] Ott, Konrad: *Ipsa Facto. Zur ethischen Begründung normativer Implikationen wissenschaftlicher Praxis*. Suhrkamp, 1997
- [Paschen u. Petermann 1992] Paschen, Herbert; Petermann, Thomas: Technikfolgen-Abschätzung: Ein strategisches Rahmenkonzept für die Analyse und Bewertung von Techniken. In: *Technikfolgen-Abschätzung als Technikforschung und Politikberatung*. Frankfurt/M.: Campus, 1992, S. 19–42
- [Pielke 2007] Pielke, Roger A. Jr: *The Honest Broker. Making Sense of Science in Policy and Politics*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007
- [Riemann 2015] Riemann, Moritz: Taking out the Trash - Radioactive Waste, Technology Assessment and Democracy. In: *Journal of Philosophical Research. Selected Papers from the XXIII World Congress of Philosophy* (2015), Nr. 40 Supplement, S. 259–262
- [Roßnagel u. Neuser 2006] Roßnagel, Alexander; Neuser, Uwe: Die rechtliche Festlegung von Risikogrenzwerten – zu einem grundsätzlichen Problem von Recht und Technik. In: *UPR* 26 (2006), Nr. 4, S. 125–131
- [Röhlig u.a. 2014] Röhlig, Klaus-Jürgen; Walther, Clemens; Bach, Friedrich-Wilhelm; Brunnengräber, Achim; Budelmann, Harald; Chaudry, Saleem; Eckhardt, Anne; Geckeis, Horst; Grunwald, Armin; Hassel, Thomas; Hocke, Peter; Lux, Karl-Heinz; Mengel, Kurt; Metz, Volker; Ott, Konrad; Plischke, Elmar; Riemann, Moritz; Smeddinck, Ulrich; Schreurs, Miranda A.; Stahlmann, Joachim: Memorandum zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe. https://www.entria.de/fileadmin/entria/Dokumente/ENTRIA_Memorandum_140430.pdf. Hannover, 2014 – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Smeddinck u. a. 2016] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.); Kuppler, Sophie (Hrsg.); Chaudry, Saleem (Hrsg.): *Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016 <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>
- [Smeddinck u. König 2016] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.); König, Claudia (Hrsg.): *Grenzwertbildung im Strahlenschutz - Physik, Recht, Toxikologie. Grundlagen, Kontraste, Perspektiven*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2016

[Smeddinck u. Roßegger 2013] Smeddinck, Ulrich; Roßegger, Ulf: Partizipation bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe - unter besonderer Berücksichtigung des Standortauswahlgesetzes. In: *Natur+Recht* 35 (2013), Nr. 8, S. 548–556

[Spaemann 2011] Spaemann, Robert: *Nach uns die Kernschmelze. Hybris im atomaren Zeitalter*. Stuttgart: Klett-Cotta, 2011

5 Ergebnisse der Teilprojekte

5.1 Einführung

Das ENTRIA-Projekt war den betrachteten Entsorgungsoptionen entsprechend in drei Vertikalprojekten organisiert, die sich jeweils mit einer Option interdisziplinär befassten und die in erster Linie von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren bearbeitet wurden. Darüber hinaus wurden alle Optionen betreffende Aspekte der Ethik, der Governance, der Technikfolgenabschätzung, des Rechts und der Risikoforschung in Transversalprojekten interdisziplinär untersucht.

Die Transversalprojekte stellten das verbindende Glied in ENTRIA dar. Ihre Aufgabe war es, die in den Vertikalprojekten untersuchten Entsorgungsoptionen unter politik- und gesellschaftswissenschaftlichen, umweltethischen und rechtlichen Gesichtspunkten und mit Bezug zu Fragen von Risiko und Sicherheit einander gegenüberzustellen. Damit waren die Transversalprojekte in besonderer Weise gefordert, ein Fundament für die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zu schaffen. Eine Sonderrolle nimmt das Transversalprojekt 1 ein, das keinen Forschungsauftrag, sondern die Synthese der Ergebnisse des Forschungsverbundes zu verantworten hatte.

5.2 Transversalprojekt 2 - Technikfolgenabschätzung und Governance

In diesem Kapitel werden die Inhalte und Ergebnisse sowohl des ITAS-Arbeitspakets zu Governance aus Perspektive der Technikfolgenabschätzung als auch des FFU-Arbeitspakets zu „Nuklearer Entsorgung aus Multi-Level-Governance-Perspektive“ zusammengefasst. Weiterhin werden die aus interdisziplinären Kooperationen resultierenden Ergebnisse vorgestellt (siehe hierzu auch Kapitel 3.7). Bei den ITAS-Modulen¹ liegt der Fokus auf der Weiterentwicklung des Governance-Begriffs und der Schnittstellen-Problematik zwischen formellem und informellem Governance-Prozess. Die Beschreibung der FFU-Forschungsperspektive und der fünf FFU-Module basiert auf einer Darstellung der inhaltlichen Arbeiten, des Forschungsstands sowie der Aufgabenstellung und Ziele.

Nachfolgend werden die interdisziplinären Arbeiten zum internationalen Vergleich sowie die weiteren Arbeiten im Rahmen interdisziplinärer Kooperationen zu den Themen „Grenzwerte“ und „Technisches Monitoring und Long-term Governance“ präsentiert. Daran schließt eine Darstellung der sonstigen Forschungsaktivitäten (Workshops, Nachwuchsförderung etc.), inkl. der Ergebnisse der ITAS- und FFU-Promotionsvorhaben an. Abschließend werden zentrale Ergebnisse präsentiert.

5.2.1 Aufgabenstellung und Stand der Forschung für das Arbeitspaket „Governance zwischen Wissenschaft und öffentlichem Protest“

Technikfolgenabschätzung befasst sich mit den Nebenfolgen von Technologien, während die Governance-Forschung sich mit Möglichkeiten modernen Regierens beschäftigt. Modernes Regieren meint hier, dass sich die Fachpolitik der nuklearen Entsorgung mit den fachpolitischen Herausforderungen und den gesellschaftlichen Erwartungen auseinandersetzt, die sich in spätmodernen Gesellschaften² entwickelt haben. D. h. nicht nur der Staat, sondern auch die Privatwirtschaft und die Öffentlichkeit werden an der Steuerung und Regelung gesellschaftlicher Angelegenhei-

¹ Die aufgeführten Module (siehe unten) sind identisch mit den im Antrag ausgewiesenen Modulen und wurden hier nur der besseren Lesbarkeit halber in den Überschriften angepasst.

² Der Begriff Spätmoderne wird hier im Sinn von Hartmut Rosa verwendet, der sich um die Herausforderungen und Defizite von modernen Gesellschaften bemüht, in denen kollektive Handlungsfähigkeit und das Regieren unter schwer veränderbar erscheinenden Sachzwängen in einem Spannungsverhältnis zueinander stehen (Rosa, 2016).

ten und insbesondere dem Fällen kollektiv verbindlicher Entscheidungen beteiligt.

Für die nukleare Entsorgung liegen gleichzeitig spezifische technische und soziale Herausforderungen vor, die sowohl die fach- als auch die gesellschaftspolitische Seite des Entsorgungsproblems betreffen. Erschwert wird diese doppelt komplexe Problemlage (Dryzek, 2013) durch die Langlebigkeit insbesondere der hoch radioaktiven Abfälle sowie die Steuerungs- und Koordinationsaufgaben, die gerade in Deutschland durch eine besondere Konfliktgeschichte beeinflusst sind. Für diese anspruchsvollen Aufgaben wurde in den letzten Jahren das neue Standortauswahlverfahren etabliert. Die Komplexität dieser Zukunftsaufgabe wurde dadurch gesteigert, dass die Aufgabe der Errichtung mit Betrieb der Anlage, dem Abfall-Monitoring und dem darauffolgenden Verschluss weit ins nächste Jahrhundert hinein, wenn nicht sogar darüber hinausreichen wird³. Damit geraten soziotechnische komplexe Interaktionen in den Blick, die moderne Industriegesellschaften in dieser Weise bisher noch nicht zu bewältigen hatten. Brunnengräber (2015) spricht in diesem Zusammenhang von „Ewigkeitslasten“. Diese Lasten lassen sich weder allein technisch noch allein gesellschaftlich bewältigen. Sie ziehen fachpolitische Planungen und technische Entwicklungsaufgaben nach sich, die wegen ihrer Einzigartigkeit als „Realexperiment“ bezeichnet werden können, da noch kein Staat bisher ein Endlager für die hoch radioaktiven Abfälle und Reststoffe in Betrieb genommen hat⁴. Bei einem Experiment dieses Typs müssen gleichzeitig komplexe gesellschaftliche Erwartungen berücksichtigt werden. Modernes Regieren (und in diesem Sinn verstehen wir hier Governance) hat auf diese Herausforderungen und Erwartungen zu reagieren. Reagieren meint aus Sicht der Technikfolgenabschätzung, dass die Vorgeschichte der Entsorgungsproblematik ebenso berücksichtigt werden muss („Historisierung“) wie auch der Kontext, in den diese fachlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen einzubetten sind („Kontextualisierung“).

Diese Erwartungen beziehen sich sowohl auf eine sicherheitstechnisch ausgerichtete Vorsorgepolitik als auch auf reflektierte Entscheidungen, die Positionen von Stakeholdern und Zivilgesellschaft substantiell berücksichtigen. Die geologische Tiefenlagerung ohne Rückholbarkeit in einem Salzstock, die mit der Erkundung für ein Endlager am Standort

³ Auch wenn Monitoringprozesse bisher häufig als befristetes Vorgehen betrachtet werden, ist auf Basis der bisher vorliegenden Unterlagen unklar, bis zu welchem Zeitpunkt diese Vorgänge abgeschlossen sein müssten.

⁴ Zum Begriff Realexperiment siehe Wagner u. Grunwald (2015).

Gorleben vorangetrieben worden war und die von zentralen Akteuren⁵ vor dem Jahr 2000 als die zu verfolgende Strategie eingeschätzt wurde, hat aus Sicht der Technikfolgenabschätzung u. a. „soziale Nebenfolgen“ hervorgerufen. Zu diesen Nebenfolgen zählt beispielsweise das erhebliche Misstrauen gegenüber den verantwortlichen fachpolitischen Akteuren ebenso wie das gegenüber der aktuellen demokratischen Praxis (Hornig u. Bauer, 2016), die letztendlich zu einem latenten Konflikt an vielen (potenziellen) Entsorgungsstandorten und zwischen mehreren Bundesländern führte (Hocke u. Kallenbach-Herbert, 2015). Dieser blockierte in der Vergangenheit die Fachpolitik (Hocke u. Grunwald, 2006), wirkt aber auch noch heute trotz neuer Randbedingungen erheblich nach. Diese also bis heute nicht zu vernachlässigenden Konfliktlagen wurden von der einschlägigen Forschung in ihrer sozialen Dynamik und ihrem soziotechnischen Charakter nicht ausreichend systematisch beleuchtet. „Soziale Prozesse“ spielen bei der nuklearen Entsorgung in Deutschland eine sehr wichtige Rolle. Sie waren schon immer Bestandteil der ursprünglichen Entsorgungspolitik, auch wenn diese ausschließlich von etablierter Politik und der Nukleargesetzgebung sowie wirtschaftlichen Vorgaben bestimmt war. Wie Hocke u. Kallenbach-Herbert (2015) sowie Blowers (2016) zeigen, führte die öffentliche Entsorgungsdebatte in Deutschland zu mehreren entscheidenden Strukturveränderungen. Nuklearkritische Strömungen in Parteien und Nichtregierungsorganisationen (NGO) sowie die großen, zunehmend politisierten Umweltverbände erhielten größeren Einfluss und forderten die früh festgelegte Entsorgungspolitik heraus (Rucht, 2008).

In ENTRIA wurden sozialwissenschaftliche Analysen und solche der Technikfolgenabschätzung unter Berücksichtigung von Governance-Prozessen vorgenommen und weiterentwickelt. Zur Verdeutlichung muss an dieser Stelle die spezifische Unterscheidung zwischen Governance und Management beachtet werden: Governance von hoch radioaktivem Abfall befasst sich mit komplexen gesellschaftlichen Interaktions- und Integrationsprozessen, während sich Management von hoch radioaktivem Abfall fast ausschließlich mit technischen und organisatorischen Aspekten des Problems auseinandersetzt (Kuppler, 2017, S. 61–96).

Die Governance-Debatte ist verknüpft mit Einschätzungen, dass Bürgerbeteiligung insbesondere in der Planungsphase von technischen Großprojekten eine wichtige Rolle spielt. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass traditionelles staatliches Top-down-Handeln (Government)

⁵Der Begriff „Akteur“ wird hier immer im Sinn von kollektiven Akteuren verwendet.

sich neuen Formen gegenüber öffnet, bei denen öffentliche Güter⁶ durch private Organisationen oder die Öffentlichkeit bereitgestellt werden. Diese neuen Formen staatlichen Handelns, wie beispielsweise konsultative Expertengremien u. a. m., werden als bürgerfreundliche Governance mit früher Stakeholder- und Öffentlichkeitsbeteiligung beschrieben (oder kritisiert) (Renn, 2013; Grande, 2012; Michelsen u. Walter, 2013; Bull, 2015; Hocke u. Smeddinck, 2017). Befürworter der Einführung von mehr partizipativen Elementen in die politische Entscheidungsfindung stellen die Erhöhung der Input-Legitimität durch das Einbeziehen von vielfältigen Interessenlagen durch die Beteiligung verschiedener Akteure in den Vordergrund. Kritiker hingegen verweisen auf die mangelnde Legitimität von Entscheidungen, die auf der Grundlage von partizipativen Prozessen gefällt werden, wegen der a) Informalität solcher diskursiver Verfahren und der geringen Anbindung an formale Entscheidungsstrukturen, b) der mangelnden Repräsentativität der beteiligten Akteure sowie c) der größeren Wirkung von machtpolitischen Ungleichgewichten zwischen den beteiligten Akteuren (Mbah, 2017).

OECD/NEA und andere Institutionen machten bereits vor Jahren plausible Vorschläge zur Umsetzung solcher Formen. In Deutschland wurde aber nicht auf Governance und Partizipation, sondern vor allem auf Informationspolitik gesetzt⁷. Entsprechend wurde überwiegend technische Sicherheitsforschung jedoch kaum politik- und sozialwissenschaftliche Forschung gefördert. Dies gilt sowohl für die Bundes- als auch für die Länderebene. Nach der Katastrophe von Fukushima (2011) folgte in Deutschland der Ausstieg aus der zivilen Nutzung der Kernenergie und es kam zu einer „atopolitischen Wende“ (Brunnengräber, 2016a). Im Rahmen der Verhandlungen über die Neustrukturierung des Standortauswahlverfahren führte dies zu Experimenten mit neuen Governance-Formen, beispielsweise in der Endlagerkommission (Brunnengräber u. Hocke, 2014; Kalmbach, 2016). Hier wurden neue Formate der Bürgerbeteiligung erprobt, u. a. ein Bürgerdialog zum Thema Öffentlichkeitsbeteiligung und die Diskussion und Beratung des Entwurfs des Abschlussberichts der Kommis-

⁶Öffentliche Güter sind Kollektivgüter, von dessen Nutzung Einzelne nicht ausgeschlossen werden können wie zum Beispiel der Konsum reiner Luft durch erfolgreiche Luftreinhaltungspolitik. Weitere Eigenschaften von öffentlichen Gütern sind erstens, dass keine Rivalität im Konsum entsteht, d. h. die öffentlichen Güter einen gleichbleibenden Wert haben, egal wie viele Individuen diese nutzen, und zweitens ist deren Produktion und Konsumption nicht teilbar. Das Gegenteil von Öffentlichen Gütern sind Öffentliche Übel, deren Beseitigung im Umkehrschluss wiederum ein Öffentliches Gut darstellt (Esser, 2000).

⁷Siehe Kuppler (2017); zu den Vorschlägen zur Umsetzung partizipativer Elemente siehe Bundesamt für Strahlenschutz (2002); OECD Nuclear Energy Agency (2004) und NEA (2010).

sion mit Experten und der interessierten Öffentlichkeit (Kühl u. a., 2016; Kalmbach, 2016).

Auch die Entwicklung und Verabschiedung des neuen Standortauswahlgesetzes (StandAG) (StandAG, 2017) ist als Versuch zu verstehen, einen konfliktlindernden gesellschaftlichen Konsens zu finden. Hierbei wird insbesondere der Öffentlichkeitsbeteiligung eine hohe Bedeutung beigemessen (Hocke u. Smeddinck, 2017). Bei dem Versuch der Konsenssuche ist die Frage zentral, wie Interessen anspruchsvoll und angemessen aggregiert werden können, um einen Entsorgungspfad festzulegen und diesen auch umzusetzen (AP 2.1)⁸. Die Entwicklung eines problemorientierten und integrativen Verständnisses, das die Optionen technisch-naturwissenschaftlich geprägter Sicherheitsanalyse mit den Eigenlogiken sozialer Prozesse verbindet, nimmt im Transversalprojekt „Technikfolgenabschätzung und Governance“ eine wichtige Stellung ein. Die Schaffung sowohl disziplinärer als auch interdisziplinärer Grundlagen ist Voraussetzung für theoretisch-konzeptionelle Ansatzpunkte, um die sozialen Prozesse für die Etablierung eines Erfolg versprechenden Entsorgungskonzepts zu reflektieren; gleichzeitig erlauben diese Grundlagen auch, interdisziplinäre Perspektiven einzunehmen und so Herausforderungen und Dilemmata bei den technisch-konzeptionellen Entscheidungen und Sicherheitsabwägungen in den Blick zu nehmen.

Durch das Standortauswahlgesetz (2017) und seine Vorbereitung (2013) und die daran anschließende Arbeit der Endlagerkommission veränderten sich wichtige Randbedingungen der Entsorgungspolitik. Die bestehenden Konfliktlinien in der Fachpolitik haben sich verändert und abgeschwächt und führten zu dem Konsens der damals rot-grünen Regierungskoalition, dass ein Standortauswahlverfahren erforderlich ist. Die zunächst favorisierte Option der tiefeingeologischen Entsorgung ohne Rückholbarkeit trat in den Hintergrund und die Alternativoption der tiefeingeologischen Entsorgung mit Rückholbarkeit setzte sich als nunmehr verabschiedete Entsorgungsstrategie durch. Mit dem Standortauswahlgesetz (2017) wurden noch weitere zentrale Forderungen der NGO aufgenommen: die Festschreibung eines standortvergleichenden Verfahrens, eine umfassende Bürgerbeteiligung und die Möglichkeit einer Rückholung.

Im Fokus der ITAS-Arbeiten war der Prozess eines fairen und akzeptablen Standortauswahlverfahrens, indem neue Formen des Entscheidens im Sinne von Governance als Weiterentwicklung und als Herausforderung

⁸Zu den Modi der Interessenaggregation über Wahlen, Fachdiskurse, politische Koalitionen etc. siehe Gerhards (1993) und (Hocke, 2006, S. 162f.).

eines repräsentativen Demokratiemodells untersucht wurden (Hocke⁹ (2017), (Mbah, 2017). In Kapitel 5.2.3 und den fortfolgenden werden die geleisteten Arbeiten kurz umrissen und ihre interdisziplinären Aspekte und dazu gehörenden Veröffentlichungen herausgestellt.

5.2.2 Aufgabenstellung und Stand der Forschung für das Arbeitspaket „Nukleare Entsorgung aus Multi-Level-Governance-Perspektive“

Lange Zeit wurde die Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe als Herausforderung verstanden, für die naturwissenschaftlich-technische Lösungen gefunden werden müssen, die daraufhin von staatlichen Entscheidungsträgern politisch umgesetzt werden können. Doch nach den Erfahrungen nicht nur in der Bundesrepublik Deutschland, sondern auch in vielen anderen Ländern, in denen hoch radioaktive Reststoffe angefallen sind bzw. weiterhin anfallen (Brunnengräber u. a., 2015b), hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass unterschiedliche sozio-politische Faktoren stark auf die jeweils gewählte technische Lösung, wie etwa eine oberflächennahe Lagerung, die tiefegeologische Lagerung oder auf die Wahl des Wirtsgesteins einwirken. Die Lösungswege folgen dabei nicht ausschließlich einer technischen bzw. naturwissenschaftlichen Logik (Brunnengräber, 2015, S. 29). Entscheidend für technische Lösungen sind neben naturräumlichen Bedingungen die institutionellen Rahmenbedingungen, wie etwa die Offenheit oder die Geschlossenheit von politischen Systemen oder der Anspruch einer Gesellschaft, in das Vorhaben eingebunden zu werden. Damit ist auch die Frage verbunden, wie verschiedene Wissensbestände, Werte und Interessen einzelner Akteursgruppen im Prozess der Optionenauswahl und der Standortsuche Gehör finden. Auch die Frage, wie einflussreich die jeweiligen Akteure sind, um ihre Positionen in den Prozess einbringen zu können, ist von Relevanz. Neben den institutionellen Rahmenbedingungen wurde daher die Rolle verschiedener Schlüsselakteure und Akteursgruppen untersucht. Eine der größten Herausforderungen für die Entsorgung war (und ist) die Langfristigkeit des Prozesses, die den idealtypischen Politikzyklus („policy cycle“) in parlamentarischen Demokratien deutlich überschreitet. Die Langfristigkeit der notwendigen Governance-Maßnahmen stellt Politik und Politikwissenschaft vor große Aufgaben; so soll allein der Auswahlprozess des möglichen Standortes eines Endlagers in der Bundesrepublik Deutschland

⁹Hocke, P. (2017): Terms Are More Than Words. The Meaning of Governance in The Context of Radioactive Waste Management. Vortrag auf der ENTRIA-Abschlusskonferenz. Braunschweig, 28.09.2017.

nach dem aktuellen Standortauswahlgesetz bis 2031 andauern (§ 1 Abs. 3 StandAG). Bei der Entsorgung handelt es sich demnach um ein „wicked problem“ – ein besonders schwer zu lösendes, komplexes Problem, das durch eine Reihe von Unsicherheiten charakterisiert ist. Aufgrund tiefgehender Differenzen bei Werten und Präferenzen der Stakeholder, die unterschiedliche Ansichten zu erwünschten Ergebnissen haben, entstehen verschiedene Konflikte (Balint u. a., 2011). Nicht nur ein geeigneter geologischer Ort muss lokalisiert und die bestmöglichen Technologien ausgewählt werden, sondern auch Interessendivergenzen aufgelöst und politische Konflikte gelöst werden, um gesellschaftliche Akzeptanz sowie Akzeptabilität für einen Standort bzw. eine Entsorgungsoption erzielen zu können. Das Konzept der Governance, wie es bereits in den Kapiteln 3.7 und 5.2.1 eingehend vorgestellt wurde, beinhaltet Fragen der Legitimität, Transparenz und der demokratischen Gestaltung von Prozessen sowie der Akteurskonstellationen, der Partizipation und der Interdependenzen zwischen Institutionen und Handlungsebenen (Multi-Level Governance). Das FFU-Arbeitspaket entwickelt Governance als wissenschaftliches Analyseinstrument fort. Multi-Level-Governance basiert auf den Grundannahmen, dass der Faktor Zeit im politischen Prozess eine erhebliche Rolle spielt und die Vielfalt an staatlichen, privatwirtschaftlichen und zivilgesellschaftlichen Akteuren zunimmt, so dass die Strukturen und Prozesse von Politik, Recht und Ökonomie komplexer und dabei die bekannten Ebenen und Arenen der politischen Aushandlung erweitert werden. Kategoriale Zuordnungen wie privat-öffentlich oder lokal-global verlieren ihre Trennschärfe, denn öffentliche und private Interessen lassen sich ebenso wie nationale, regionale und lokale Ebenen kaum noch unabhängig voneinander betrachten, sie stehen in enger Wechselwirkung zueinander (Brunnengräber, 2015). Den folgenden Dimensionen wird vor diesem Hintergrund genauer nachgegangen:

1. Die Möglichkeitsdimension: Im Zuge des Atomausstiegs verändert sich das policy-Feld; neue Institutionen und neue Handlungsmöglichkeiten entstehen – und damit ein „window of opportunity“. Es ist allerdings noch nicht entschieden, ob sich dieses Fenster weiter öffnen oder wieder schließen wird.
2. Die Akteursdimension: Unter den Akteuren liegen Differenzen in Bezug auf Interessen, Werte und Präferenzen vor, die sich über einen längeren Zeitraum verfestigt und Konfliktlinien ausgebildet haben. Diese Interessen, Werte und Präferenzen sind veränderlich und infolgedessen verringerte sich das Konfliktpotential vorübergehend.

Mit der Festlegung von zu untersuchenden Standorten können sich allerdings neue Konflikte ergeben.

3. Die Mehrebenenendimension: Die Suche nach einem Endlager nimmt in einer komplexen Wechselwirkung von internationalen, europäischen, nationalen sowie regionalen und lokalen Politiken Gestalt an. Sie ist entsprechend mit verschiedenen Handlungsebenen und deren Besonderheiten konfrontiert.
4. Die Interdependenzdimension: Wechselwirkungen und Kohärenzprobleme zwischen den policy-Feldern sind bei der Suche nach Wegen zur Problembearbeitung der Normalfall. Politische, soziale, ökologische, wirtschaftliche und technische Aspekte sind eng miteinander verzahnt. Die Zwischenlagerung, die Standortsuche und das Endlager werden zum „wicked problem“.

5.2.3 Governance aus Sicht der Technikfolgenabschätzung und der Politikwissenschaften

Im Folgenden werden die ITAS-Arbeiten mit dem Kurztitel „Governance zwischen Wissenschaft und öffentlichem Protest“ (AP 2.1) dargestellt, welche das Vorhaben beinhalten, Konfliktlinien einer komplexen Entscheidungslage und Herausforderungen für die Suche nach einer robusten Entscheidung herauszuarbeiten. Die drei Kernmodule werden nachfolgend vorgestellt und ihre Ergebnisse in Kapitel 9.5 zusammengefasst.

Arbeitspaket 2.1 in Transversalprojekt 2: Governance zwischen Wissenschaft und öffentlichem Protest. Einführung in den ITAS-Ansatz. Politisches Handeln zeichnet sich durch das Ziel aus, kollektiv verbindliche Entscheidungen sicherzustellen. Dies geschieht durch das Verabschieden von Gesetzen, aber auch durch Festlegungen und Einzelentscheidungen, welche die Fachpolitiken konzeptionell und strategisch rahmen und fortschreiben. Governance wird hier als Thema der sozialwissenschaftlichen Forschung aufgegriffen (vgl. Grande (2012); Mayntz (2009b,c); Michelsen u. Walter (2013)) und in den Kontext der Endlagerforschung eingeführt (Kuppler u. Hocke¹⁰ (2016); Hocke¹¹ (2017); Kuppler (2017); Hocke (2015a)). Die festgehaltenen Ergebnisse dieses AP liefern zentrales Kontextwissen,

¹⁰Kuppler, S., Hocke, P. (2016): Governance als Analysekonzept für die aktuelle Endlagerpolitik? Ein Problemaufriss. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“. Institut für Radioökologie und Strahlenschutz. Hannover, 02.02.2016.

¹¹Hocke, P. (2017): a. a. O.

ohne die Vor- oder Nachteile für eine der drei ENTRIA-Optionen unmittelbar auszuweisen. Mit der Festlegung der Entsorgungspolitik auf eine bestimmte Entsorgungsoption sind spezifische Herausforderungen verbunden (z. B. in Bezug auf die Ausgestaltung der Institutionen, die das Vorhaben begleiten). Bewusst gestaltete Governance bietet dann die Möglichkeit, die Fachpolitik der Entsorgung so zu strukturieren, dass formal verbindliche Entscheidungsfindung (inkl. ihrer gerichtlichen Überprüfbarkeit) und häufig informell stattfindende Entscheidungsvorbereitung sowie das Begleiten der Umsetzung einer stufenweisen Entsorgungspolitik aktuelle Qualitätserwartungen erfüllen (Hocke u. Smeddinck, 2017).

ITAS-Modul A „Governance 1: Gegenwartsdiagnose und Problemdefinition“

Das ITAS-Modul¹² Governance 1 analysiert die sozialwissenschaftliche Governance-Debatte unter der Fragestellung ihrer Anwendbarkeit für die Analyse der Entsorgungspolitik. Dazu wurde die neuere Governance-Forschung gesichtet, ein analytisch ertragreicher Governance-Begriff entwickelt und im Hinblick auf die Endlager-Politik weiterentwickelt, um die Spezifik des deutschen Falls zu berücksichtigen. Ziel von Governance ist es, eine nicht-hierarchische Form politischen Handelns zu etablieren, bei der kollektiv verbindliche Entscheidungen getroffen werden, die auf Diskurs und Beratungen („Deliberation“) und folglich auf Argumenten aufbauen, und die zu Entscheidungen über öffentliche Güter führen (wie dem Schutz von Mensch und Umwelt bei der nuklearen Entsorgung). Governance ist damit eine Reaktion auf das Scheitern klassischer Top-down-Steuerung ohne souveräne, hierarchische staatliche Steuerungsleistung gänzlich ersetzen zu wollen (Marschall, 2008). Das Versprechen, auf das Governance prospektiv verweist, wäre dann eines der kollektiven Konfliktlösung. Einige Autoren verstehen daher die Debatte über Governance als wenig ertragreich, da Steuerungsansätze in den letzten Jahrzehnten kein prominentes Thema der sozialwissenschaftlichen Debatte waren¹³. Die Forschungen des ITAS-ENTRIA-Teams kamen dagegen zu dem Ergebnis, dass die Governance-Forschung analytisch ertragreich eingesetzt werden kann (siehe Kap. 3.7). Aus Sicht der Politischen Soziologie und der Politikwissenschaften werden in der Governance-Debatte Grundfiguren ins Spiel gebracht, die es ermöglichen, einen theoretisch-konzeptionellen Kern zu entwickeln. Darauf aufbauend werden Begründungen entwickelt,

¹²Die Kennzeichnung der ITAS-Module folgt der Nummerierung in der ENTRIA-Vorhabenbeschreibung.

¹³Offe (2008) bezeichnet den Begriff Governance als „empty signifier“, also als einen inhaltsleeren Begriff, der auf Mythen der sozialwissenschaftlichen Steuerungsdebatte aus den 1970er Jahren aufsetzt.

die die analytische Perspektive und Problemlage verdeutlichen, mit der sich die Governance-Forschung auseinandersetzt. In diesem Kapitel wird erläutert, welche Herausforderungen sowohl für die staatlichen Institutionen, die Wirtschaft, die Politik und die Zivilgesellschaft entstehen, wenn es um die nukleare Entsorgung als soziotechnisches Problem geht (Hocke, 2016). Zur Entwicklung dieser Grundfiguren der Governance-Forschung wird auf Mayntz, Grande sowie Michelsen und Walter zurückgegriffen¹⁴. Regelnde Strukturen sind für Mayntz (2009a) spezifische „Produktionsstrukturen“, die von kollektiven Akteuren gestaltet werden, und stellen den zentralen Ansatzpunkt ihrer Gedankenfigur dar. Diese Produktionsstrukturen umfassen jeweils die „unmittelbare Erzeugung eines Gutes“ oder einer Dienstleistung. Viele Politiken, die Veränderung wollen, sind Innovationspolitiken – also Politiken, die am Markt erfolgreich technologische Innovation fördern wollen (neue Produkte, neue Herstellungsverfahren) (Mayntz, 2009c, S. 105). Es geht folglich um die „Chancen“ und „Risiken / nichtintendierten Folgen“ dieser meist technikbasierten Innovationen. Innovationsprozesse haben sich historisch und konzeptionell in der Bundesrepublik verändert, so ihre These. Sie umfassen die Genese eines Gutes, seine Nutzung und seine Folgen aktuell in einer anderen Weise als vor drei oder vier Jahrzehnten (Mayntz, 2009c, S. 107): Der Wandel lasse sich vereinfacht als Wechsel von der klassischen Top-down-Steuerung über Zwischenschritte hin zu Governance als „Kontextsteuerung“ umschreiben.

Mayntz (2009c) identifiziert vier strukturbildende Prozesse, die bei diesem Wandel ineinander greifen: (1) vertikale Differenzierung, (2) horizontale Differenzierung, (3) Veränderung der Ansatzpunkte und (4) Diversifizierung der Instrumente. Daraus folgt die institutionelle Einbindung von Grundlagenforschung, anwendungsorientierter Forschung, produzierenden Unternehmen, Banken sowie Akteuren des Finanzmarktes und „Kontextbildern“, manchmal auch Konsumenten, die alle in die Gestaltung der Produktion von Gütern eingreifen. Damit formuliert Mayntz eine gesellschaftliche Gegenwartsanalyse, die wirtschaftliche Triebkräfte in den Mittelpunkt stellt und der Gesellschaft die Rolle zuweist, diese Güter- und Warenproduktion innovativ zu gestalten. Innovation wird also auch als kulturelle Leistung verstanden, die der Wirtschaftssphäre ebenso dient wie auch der Zivilgesellschaft. Genau diese Produktion von Gütern ist es, die auch Grande (2012) in seiner sich deutlich von Mayntz unterscheidenden Position hervorhebt. Allerdings spricht Grande nicht von Gütern, die in Wirtschaftskreisläufen produktiv und innovativ genutzt werden sollen. Ihm geht es dezidiert um „öffentliche Güter“. Ein zentrales Merkmal in

¹⁴Zum Unterschied von Government und Governance siehe Kapitel 3.7.1.

der Forschungsdebatte ist für ihn die „Betonung nicht-hierarchischer Formen der Produktion öffentlicher Güter“ (Grande, 2012, S. 566). Öffentliche Güter unterscheiden sich substantiell von privatwirtschaftlich hergestellten Gütern (Crouch, 2004)¹⁵.

Sie folgen einer eigenen Logik und Funktionsweisen, die nicht an der Zufriedenheit des „Konsumenten“ orientiert, sondern in gesellschaftliche Zielhorizonte eingebunden sind (wie z. B. Gesundheitsfürsorge). Allerdings – ähnlich wie bei privatwirtschaftlichen Gütern – besitzt in Gegenwartsgesellschaften die Optimierung und Effizienzsteigerung eine spezifische gesellschaftspolitische Zielrichtung. Eine bedeutsame Stärke von Grande besteht darin, dass er in der vorliegenden Governance-Forschung die charakterisierenden Merkmale von Governance zusammenstellt und die aus seiner Sicht wirkmächtigen Merkmale hervorhebt. Grande stuft die Governance--Forschung als einen der „lebhaftesten“ und wichtigsten Forschungsschwerpunkte der letzten zwei Dekaden ein. Sie scheint aber auch zu einem universellen Instrument der Politikwissenschaften geworden zu sein (Grande, 2012, S. 565), bei dem einige zentrale Aspekte nicht gut geklärt seien. So stellt er – in Anlehnung an Offe (2008) – fest, dass der Gegenstandsbereich, der erklärt werden soll, nicht deutlich ist. Dies habe seinen Grund vor allem darin, dass er vielfältig und primär negativ bestimmt ist: Charakterisierend für den Forschungsgegenstand (siehe (Grande, 2012, S. 566–568)) sei, dass

- kein klassischer souverän-hierarchischer Staat mehr vorhanden ist,
- Governance auf Strukturen verweist, die kein Teil kompetitiver Märkte sind, und
- keine zivilgesellschaftliche Selbstorganisation ohne öffentliche Funktion stattfindet.

Weitere wichtige Merkmale, die den konzeptionellen Kern des Governance-Konzepts in der Politikwissenschaft bestimmen, sind

- die Betonung der nicht-hierarchischen Produktion öffentlicher Güter¹⁶,
- die Kritik am Staat als exklusivem Produzenten öffentlicher Güter,
- der angestrebte Mechanismus der Interdependenzbewältigung, der durch die Globalisierung benötigt wird,

¹⁵Für eine allgemeine Definition öffentlicher Güter siehe auch Esser (2000).

¹⁶Während Mayntz auf die Produktion wirtschaftlicher Güter und Innovationen abstellt, meint Grande die Produktion öffentlicher Güter.

- die erhebliche Steigerung der Komplexität politischen Handelns, die sich insbesondere in den Akteurskonstellationen und institutionellen Architekturen zeigt, sowie
- der zunehmende Bedarf und die zunehmende Bedeutung von „Koordination“ und „Kooperation“.

Jenseits seiner Kritik an mangelnder Definition und einheitlicher Bedeutungszuweisung ist mit Grande jedoch auszumachen, dass der Fokus auch bei öffentlichen Gütern sowohl in der Bereitstellung von Dienstleistungen als auch in der Problembearbeitung liegen kann. Dabei sollen sowohl „soziale Integration“ als auch Effizienzsteigerungen im Entscheidungsprozess erreicht werden. Das Konfliktpotential in funktional differenzierten Gesellschaften soll also durch den Einsatz von Governance-Formen staatlichen Handelns gesenkt werden (Lange u. Schimank, 2004; Haus, 2010). Somit wird ein Ziel ausgemacht, das von zivilen Werten geprägte Formen der Konfliktbearbeitung und des Interessenausgleichs in den Mittelpunkt stellt. In der politischen Wirklichkeit gehe es aber nicht immer um Problemlösung und die gemeinsame Suche von Konfliktlösungen, sondern auch um Machtgewinn und Machterhalt (Grande, 2012, S. 584f). Grande entwickelt eine plausible Grundüberlegung für die strategische Ausrichtung „modernisierten Regierungshandelns“. Um in Zeiten der Globalisierung die zunehmenden Interdependenzen, z. B. zwischen gesellschaftlichen Teilsystemen, verschiedenen territorialen Handlungsebenen und verschiedenen Politikfeldern bewältigen zu können, bedarf es einer stärkeren „Koordination“ und „Kooperation“ – ein Argument, auf das an anderer Stelle zurückzukommen ist. Die Entwicklung von etablierter Steuerung und Top-down-Handeln hin zu netzwerkförmigen und integrierenden Handlungsformen ist in der sozialwissenschaftlichen Forschung bisher nicht gut belegt¹⁷. Dies gilt insbesondere bei der deutschen Entsorgungspolitik. Kooperation, Partizipation und Netzwerke werden in der Governance-Diskussion auch problematisiert, so beispielsweise von Michelsen u. Walter (2013). Bei der Umsetzung staatlicher Entscheidungen und Beschlüsse gewinnen „weichere“ Formen der politischen Steuerung“ an Bedeutung (ebd.). Dabei entstehen „Räume, in denen die Interaktionen nicht durch die traditionellen Anforderungen responsiver Politik“ bestimmt werden (Michelsen u. Walter, 2013, S. 179). D.h. die formale Verantwortung für politische Maßnahmen, die sie stützenden Argumente und die sie verantwortenden Akteure sind nicht mehr so deutlich zuzuweisen, wie dies nach Beschreibungen repräsentativ-demokratischer Steuerung der Fall sein sollte. Governance-Konzepten wird fallweise die

¹⁷Siehe dazu (Kuppler, 2017, S. 27-30).

„Auswanderung aus den Verfassungsinstitutionen“ (ebd.) zugeschrieben. Gemeint ist damit, dass wesentliche Entscheidungen z. T. in die informellen Sektoren der Gesellschaft verlagert werden, die neben den politischen Institutionen liegen, die im ordnungsstaatlichen Denken allein für kollektiv verbindliche Entscheidungen zuständig und daher auch verantwortlich sind. Es sei ein fragwürdiges Vertrauen, das in Experten gesetzt werde, die „einfach objektivierbare, aus abstrakten Ideeengebäuden deduzierte Evaluationskriterien“ formulieren und damit Konfliktbewältigung erreichen (ebd., S. 182). Folglich handelt es sich um ein Zurückdrängen „mandatierter“ zugunsten „qualifizierter Kooperation“.

Demokratische Politik wird von (Michelsen u. Walter, 2013, S. 200) als die „endlose Wiederaufnahme“ von Meinungsverschiedenheiten und Konflikten definiert. Hierbei begünstigt deliberative Konsensdemokratie die „kleine Politik, in der die Austragung großer Konflikte“ oft nicht erreicht wird. Auch wenn Deliberation zu demokratischen Entscheidungen beiträgt, ist die „Persistenz der Hierarchie“ (Lynn, 2011) nicht auszuschließen. Durch den „Schatten der Hierarchie“ ((Torfing, 2006, S. 111); vgl. auch Marschall (2008)) werden die Möglichkeiten eingeschränkt, die das Verhandeln auf Augenhöhe in sich trägt. Sie betonen, dass der Mangel an Alternativen zu präferierten Entscheidungspfaden oft als Skandal oder Unrecht wahrgenommen wird. Nach (Haus, 2010, S. 160) entstehen durch Regulierung Erwartungen an das Handeln von Regierungsorganisationen, die durch governanceförmiges Handeln reflektiert werden und zu Anpassungen und Optimierungen einmal angestoßener Handlungsstrategien führen können. Governanceprozesse weisen also analytisch betrachtet auf Herausforderungen hin, die auf vier verschiedenen Ebenen liegen, und deren gemeinsame Betrachtung erkennbar macht, ob sich Strömungen der Entpolitisierung oder des konstruktiven Umgangs mit politischen Konflikten durchsetzen:

1. Der Grad einer gesellschaftspolitischen Steuerung, die besonders auf Effizienz fokussiert und funktionale Veränderungen in der Zusammenarbeit von Akteuren ermöglicht.
2. Die Pluralität im Diskurs und damit die Möglichkeit für verschiedene Akteure, an der Definition und Etablierung alternativer Governance-Netzwerke mitzuwirken (Gouvernementalität).
3. Eine gesellschaftliche Reflexion und Debatte über „Leitideen von Staat und Gesellschaft“, d. h. über Erwartungen an Input- und Output-Legitimität, die zur gesellschaftlichen Integration beitragen kann.

4. Die politische Antwort auf eine globalisierte und von ökonomischen Imperativen geprägte Welt in Form von Regulierung (aufbauend auf Kuppler u. Hocke¹⁸ (2016)).

Da Governance nicht nur im akademisch-wissenschaftlichen Kontext, sondern auch in der politischen Praxis (z. B. auf europäischer Ebene) Aufmerksamkeit findet, wurden normative Elemente gesondert betrachtet. Dabei wurde besonders darauf geachtet, wie die Qualität „modernen Regierens“ im Sinn der Governance-Debatte operationalisiert werden kann („good governance“) (Grunwald, 2010a, S. 82f)¹⁹. Die Frage ist dabei, ob der Zivilität der gesellschaftlichen Problembearbeitung eine besondere Bedeutung zugewiesen wird. Zivilität wird hier verstanden als normatives Konzept, mit dem auf Dissens, Auseinandersetzungen und Konflikt reagiert wird. Es besteht auf Positionen des Respekts und sozialer Anerkennung einerseits (siehe Honneth (2016)) und auf Verfahrensgerechtigkeit als Prozessqualität andererseits. Verfahrensgerechtigkeit lässt sich bei den Herausforderungen der nuklearen Entsorgung und dem zugehörigen erheblichen Zeitaufwand, der sich für eine Standortauswahl als notwendig herausgestellt hat, nicht allein durch Verbesserungen des formellen Genehmigungsverfahrens erreichen. Entsprechend werden heute Entscheidungspfade als stufenweises Vorgehen geplant, mit dem tolerierbare Ergebnisse erzielt werden können (OECD Nuclear Energy Agency, 2004; Endlagerkommission, 2016; Hocke, 2013). Wichtige Elemente für das Gelingen eines fairen Entscheidungsprozesses, die die zentralen Kriterien Gerechtigkeit und Sicherheit zu erfüllen vermögen, sind Partizipation und Deliberation. Dennoch ist die Erfüllung dieser Kriterien keine Gewährleistung dafür, dass eine Entscheidung getroffen wird, die als akzeptabel oder gut bewertet werden kann, oder dass der Prozess überhaupt in eine Entscheidungsfindung mündet. Noch weniger kann angenommen werden, dass mit dem Erfüllen sämtlicher Mindest-Gelingsbedingungen²⁰ soziale Proteste oder Konflikte ausgeschlossen werden können. Vielmehr muss die Erfüllung von Mindeststandards der Prozessqualität im Sinne einer Gelingsbedingung unter vielen gesehen werden, ohne die kein Fortschritt in der Lösung des Problems der Entsorgung nuklearer Abfälle möglich sein wird.

¹⁸Kuppler, S., Hocke, P. (2016): a. a. O.

¹⁹Siehe außerdem Kapitel 3.7.1.

²⁰Grunwald (2010b), (Drögemüller u. Kuppler, 2017a), (Grunwald, 2010a, S. 82).

ITAS-B „Governance 2: Schnittstellen zwischen formellem und informellem Prozess“

Durch den Wechsel von Government zu Governance mit frühen, häufig informellen Prozessen der Vorabstimmung und Beratung entstehen nicht nur neue Gestaltungsräume für die Vorbereitung verbindlicher Entscheidungen. Gleichzeitig wird auch die Problematik der Gestaltung von Schnittstellen zwischen Regierungshandeln, exekutiver Umsetzung und Möglichkeiten juristischer Überprüfung von Entscheidungen aufgeworfen.

Ein Beispiel für eine solche Änderung ist die Gründung eines neuen Beratungsgremiums, in dem nicht-staatliche kollektive Akteure Mitglieder sind, mit dem Ziel eines erweiterten und langfristig auch eines beratungsorientierten Interessenausgleichs²¹. Das neu eingeführte Nationale Begleitgremium (NBG) zur Standortsuche stellt eine solche Schnittstelle dar, die formelle und informelle Entscheidungsprozesse vermitteln und damit die Qualität der Entscheidungsprozesse langfristig optimieren soll. Das NBG besteht bisher aus neun Mitgliedern (u. a. drei Bürgervertreterinnen und -vertreter), die in einem aufwendigen Auswahlverfahren nominiert wurden²². Ihre Aufgabe ist es, als Vermittlungsinstanz zwischen Öffentlichkeit und Entscheidungsträgern zu fungieren, d. h. einerseits ist das NBG für das Konfliktmanagement zuständig und andererseits hat es eine beratende und kontrollierende Funktion bei der Standortsuche inne²³.

Das in § 8 im Standortauswahlgesetz von 2013 skizzierte gesellschaftliche Begleitgremium wurde von der Endlagerkommission in Kapitel 4.2.3 des Abschlussberichts (Endlagerkommission, 2016) konkretisiert. Dieses Ergebnis wurde durch den Bundestag und Bundesrat in wesentlichen Punkten akzeptiert. Die Expertengruppe der Endlagerkommission war ebenso plural zusammengesetzt; sie bestand aus Akteuren aus Politik und Verwaltung, Wirtschaft, Wissenschaft und Öffentlichkeit und war durch den Bundestag nominiert worden. Die Endlagerkommission hatte

²¹Das Mandat des Nationalen Begleitgremiums spricht an dieser Stelle von „vermitteln-de(r) und unabhängige(r) Begleitung des Standortauswahlverfahrens bis zur Standortentscheidung. Dazu gehört insbesondere auch die begleitende Umsetzung der Öffentlichkeitsbeteiligung am Standortauswahlverfahren“ (Deutscher Bundestag 20.07.2017). Faktisch geht es hierbei um einen langfristigen und beratungsorientierten Interessenausgleich.

²²Die Mitglieder des NBG wurden z. T. direkt von Bundestag und Bundesrat gewählt und z. T. in einem mehrstufigen Beteiligungsverfahren nominiert und anschließend von der damaligen Bundesumweltministerin Hendricks ernannt (Bundesamt für Strahlenschutz 2017).

²³<http://www.nationales-begleitgremium.de/>

die Aufgabe das Standortauswahlgesetz von 2013 zu prüfen und Kriterien für ein robustes Standortauswahlverfahren festzulegen (Smeddinck, 2017b,a). Dies ist der Endlagerkommission mit der Vorlage des Abschlussberichts im Juni 2016 auch gelungen (Endlagerkommission, 2016). Beim Nationalen Begleitgremium (NBG) handelt es sich also um ein formell in besonderer Weise durch das Standortauswahlgesetz legitimates Gremium, das von Expertinnen und Experten zusammen mit Bürgervertreterinnen und -vertretern ohne eindeutigen Stakeholder-Bezug die aktuelle Phase des Standortauswahlverfahrens kritisch begleiten und damit nationale Öffentlichkeitsbeteiligung mit limitierten Ressourcen sicherstellen soll²⁴. Diese beiden Beratungsgremien sind folglich aktuelle Beispiele des Wandels von traditionellen Government- hin zu neuen Prozessen und Formen des Entscheidens in flexiblen Governance-Strukturen, in denen unterschiedliche Akteure auf verschiedenen Ebenen zusammenarbeiten. Diese Governance-Perspektive fragt nach den Formen der Zusammenarbeit mit dem Ziel, Entscheidungsprozesse funktional robuster zu gestalten. Da Governance in der hier vorgenommenen Perspektive als Form komplexer gesellschaftlicher Interaktions- und Integrationsprozesse, kurz: als Regieren in Netzwerken betrachtet wird und zusätzlich eine Öffnung für nicht-staatliche Akteure in horizontaler Ebene beinhaltet, stellt sich die Frage nach der Qualität dieser pluralistischen Ausgestaltung des Netzwerkes. Dies bedeutet, dass nicht nur nach der Effizienz von Netzwerken gefragt wird, sondern auch nach der Auswahl der in die Netzwerke eingebundenen kollektiven Akteure.

Als Kriterien für die Analyse zu nennen sind die Integrationsleistung inkl. der Konfliktbearbeitung einerseits und die Effizienz dieser neuen deliberativen Prozesse andererseits. Als Verknüpfung dienen die formellen und informellen Komponenten der Netzwerke für die Bereitstellung einer Lösung für die Entsorgungsfrage unter Einbeziehung wichtiger kollektiver Akteure (vgl. (Kuppler, 2017, S. 65).

Auch Grande (2012) plädiert für ein Governance-Verständnis, in dem der Fokus nicht auf vorab definierten Erfolgs- und Effizienzkriterien liegt, sondern in dem Ziele erst während des Prozesses festgelegt werden. Der Erfolg von Governance läge damit nicht nur in der Erreichung eines Ziels (hier: Bau eines Endlagers), sondern auch in der „Akzeptanz der Folgen von Governance-Regimen durch die beteiligten und betroffenen Akteure“ (Grande, 2012, S. 584). Der Bau des Endlagers muss demnach auch von

²⁴Vgl. das Botschafter-Modell in der Endlagerkommission (siehe Gallego Carrera u. Hocke (2016). Zur Arbeit des NBG liegen aktuell noch keine detaillierten empirischen Forschungen vor, siehe aber zur formalen Ausgestaltung § 8 der Kommentierung des Standortauswahlgesetzes von Smeddinck (2017a).

den beteiligten und betroffenen Kollektiv- und Einzel-Akteuren als legitim angesehen werden (Kuppler, 2017, S. 67). Da die Endlagerfrage als ein „wicked problem“ zu verstehen ist und die unterschiedlichen Kollektiv- und Einzel-Akteure, die an der Lösung dieser Frage interessiert sind, unterschiedliche Problemdefinitionen haben, besitzt der Prozess der Standortauswahl und die darauf folgenden Prozesse der Errichtung einer langfristigen Entsorgungslösung ein ‚offenes Ende‘. Unterschiedliche Problemdefinitionen führen auch zu einem unterschiedlichen Konfliktverständnis und dementsprechend auch zu einem immer wieder neu zu präzisierenden Prozessverständnis. Debatte und Diskurs werden sich also als Handeln an den Schnittstellen und den dabei im positiven Fall zu erreichenden „checks and balances“ auszuformen haben.

Wer als Problem eine ungerechte Lastenverteilung sieht, wird als Grund für den Konflikt einen mangelnden Interessenausgleich und nicht ausreichende Kompensationen für die entstehenden Lasten sehen. Wer als Problem ein fehlendes Mitspracherecht der Bevölkerung an einem potentiellen Standort sieht, wird als Grund für den Konflikt eine mangelnde Anerkennung im Bereich des Rechts sehen (vgl. Honneth (1995)). Aus diesen unterschiedlichen Konfliktverständnissen ergeben sich folglich unterschiedliche Anforderungen an Input-Legitimität, Endlager-Management und deliberative Endlager-Governance. Rahmenbedingungen sind also nicht nur für ein unterschiedliches Verständnis von Regieren (deliberativ vs. repräsentativ), sondern auch für unterschiedliche Konfliktverständnisse auszumachen²⁵. Die so entstehenden Chancen und Dilemmata jeder partizipativen Abfallpolitik werden durch mehrere entscheidende Aspekte bestimmt. Dies beginnt damit, dass Stakeholder mit ihren verschiedensten Interessen und Eigenlogiken zu unterschiedlichen Zeitpunkten in Entscheidungsprozesse eingebunden werden. Hierbei gilt es zu beachten, dass derartige Beteiligungen die repräsentative Entscheidungsfindung herausfordern können, da zentrale Prinzipien der repräsentativen Demokratie wie die der Gleichheit und Repräsentativität in Frage gestellt werden könnten und damit die Legitimität von solchen Entscheidungen zu prüfen ist (Mbah, 2017). Diese so entstehenden sozialen Prozesse können zwar die Input-Legitimität erhöhen, wenn wichtige Kriterien der Beteiligung²⁶ beachtet und erfüllt werden, sie rufen aber auch Nebenfolgen hervor. Dazu gehört z. B. die Veränderung der Rolle der Wissenschaft und ihrer anwendungsorientierten Projekte, die immer

²⁵ Vgl. (Kuppler, 2017, S. 68) sowie auch das ENTRIA-Memorandum (Röhlig u. a., 2014, S. 29-32), das auf das Spannungsverhältnis zwischen verschiedenen Demokratiemodellen hinweist, die sich auch durch die Bearbeitung technischer Großkonflikte wie dem der nuklearen Entsorgung fortschreiben.

²⁶ Zu Kriterien der Beteiligung siehe Lehtonen (2010) und Renn (2013).

wieder – wie auch bei der Arbeit der Endlagerkommission geschehen – in Frage gestellt werden. Daraus ergeben sich neue Komplexitäten, für die ebenso angemessene Lösungen zu entwickeln sind. In Beteiligungsprozessen können beispielsweise von Wissenschaftlern verfasste Gutachten und Gegengutachten eine wichtige Rolle einnehmen, denn der wissenschaftliche Dissens (Expertendissens) kann den sozialen Prozess der Beteiligung wesentlich beeinflussen, indem Konzepte in Frage gestellt werden, Unsicherheiten offenbar werden und in der Folge die Spaltung der Teilnehmer von Beteiligungsprozessen in verschiedene Meinungs-lager verstärkt und damit Kompromisse oder Einigung erschweren.

Als einen positiven Aspekt partizipativer Elemente ist dennoch das Einbeziehen verschiedener Wissensbestände und Interessenlagen zu nennen, da dies nicht nur sicherstellt, dass Zugangs- und Mitbestimmungsmöglichkeiten in Entscheidungsprozessen gewährt oder verbessert werden (Mbah, 2017), sondern Lernprozesse bei den Teilnehmenden und verantwortlichen Entscheidern ausgelöst werden. Gleichzeitig wird auch die Vorabstimmung von Entscheidungsalternativen (wie dem „richtigen“ Vorgehen bei der Standortsuche) selbst zu einem Vorgang, der Kritik und Prozesse frühzeitiger Politisierung von Fachfragen hervorrufen kann. Einerseits werden aus Perspektive der Befürworterinnen und Befürworter umfassender partizipativer Vorgehensweisen deliberative Vorabstimmungen dahingehend kritisiert, dass damit die partizipativen Elemente in Entscheidungsprozessen an Bedeutung verlieren und folglich eine Form der Schein-Partizipation erfolgt. Die Vorabstimmung in deliberativen Foren kann den Kriterien der Transparenz, Gleichheit und Offenheit nicht oder nur in einem begrenzten Umfang gerecht werden. Andererseits kann eine deliberative Entscheidungsvorbereitung als eine Möglichkeit gesehen werden, Ergebnisse aus partizipativen Verfahren in die parlamentarische Entscheidungsfindung einfließen zu lassen und so partizipative Verfahrenselemente wieder an den politischen Prozess anzubinden, um gesetzlich legitime Entscheidungen hervorzubringen (Mbah, 2017). Governance-Prozesse mit partizipativen Elementen können gerade bei Technologiepolitiken wie der der Abfallentsorgung auch ambivalente Effekte gegenüber der Beurteilung von Qualitätskriterien wie Transparenz, Offenheit sowie Gleichheit der Stimmen und Argumente hervorbringen. Da die aktive Endlager-Governance für ein ausgesprochen langfristiges „Unterfangen“ heute konzeptionell aufzusetzen ist²⁷,

²⁷N. Wulf schlägt angesichts der heute festzustellenden Ungewissheiten vor, nicht einfach von einem langfristigen Verfahren, sondern von einem Unterfangen zu sprechen, das sich durch erhebliches Nichtwissen auszeichnet, das z. T. nicht auflösbar ist (siehe dazu Kap. 5.2.3).

wird auch der Gestaltungsprozess mit seinen demokratischen Implikationen vor eine erhebliche Herausforderung gestellt. Die Zeiträume, die durch kollektive verbindliche Entscheidungen des (fach-)politischen Systems zum Thema nukleare Entsorgung zu koordinieren und zu planen sind, beziehen sich auf Zeitspannen, die nur schwer zu überblicken, aber entsorgungs- und sicherheitspolitisch trotzdem zu „adressieren“ sind. Die erwarteten Zeitspannen reichen von einigen wenigen Jahrzehnten bis zu mehr als einem Dutzend Jahrzehnten. Anlagenpolitik, z. B. bei Kraftwerken, umfasst heute häufig Zeithorizonte von drei bis fünf Jahrzehnten. Angesichts dieser größeren Zeitspannen sprechen wir von Zeiträumen, bei denen modernes Regieren in der Entsorgungspolitik insbesondere hoch radioaktiver Abfälle als „Long-term Governance“ zu bezeichnen ist, die ohne staatlichen Akteur und ohne in spezifischer Form konsistentem staatlichen Handeln aller Voraussicht nach nicht auskommen wird (siehe dazu Kap. 5.2.4).

ITAS-C „Auswege aus klassischen Dilemmata der Entscheidungsfindung“

Neue Formen der Kooperation und Koordination in einem Konflikt einzuführen, der über mehrere Jahrzehnte hochpolitisiert war, ist selbstredend kein Vorgang, bei dem auf etablierte Routinen zurückgegriffen werden kann. Dies gilt weder für Regierungsorganisationen unter sich noch für deren Kooperation mit Stakeholdern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft. Aus Perspektive der Technikfolgenabschätzung liegt es vielmehr nahe, von einem „Realexperiment“ oder einem Versuch zu sprechen, eine soziale Innovation zu realisieren²⁸. Beide Begriffe verweisen darauf, dass

- anspruchsvolle Vorgänge unter sehr spezifischen Kontextbedingungen zu organisieren sind und
- diese Vorgänge in der Regel ob ihrer Neuheit einen offenen Ausgang besitzen.

Bei der Sichtung der einschlägigen Forschungsliteratur war festzustellen, dass dieser Typ von Schwierigkeiten bei der Errichtung von nuklearen Entsorgungsanlagen nicht systematisch in den Blick genommen wurde – weder bezüglich einer Reflexion der Kontextbedingungen noch des Umgangs mit der Herausforderung, nur sehr begrenzt auf bestehende Erfahrungen in der Kooperation und Koordination zurückgreifen zu können (vgl. Streffer u. a. (2011); Hocke (2016); OECD Nuclear Energy Agency

²⁸Zum Konzept der Realexperimente siehe Wagner u. Grunwald (2015), zur sozialen Innovation siehe auch Rückert-John (2013) und Weyer (2008).

(2004); Bundesamt für Strahlenschutz (2002)). „Gelingensbedingungen“ (wie oben schon ausgeführt) für eine Standortauswahl in diesem Kontext basieren zunächst auf einer gewissen „Gelingenszuversicht“. Ohne diese bräuchte man sich nicht um eine Konfliktbearbeitung zu bemühen (vgl. Grunwald (2010a) nach Gethmann (1982)). Besteht ernsthaftes Interesse an der Umsetzung einer Konfliktbearbeitung, ist die Zuversicht zwar notwendig, aber nicht hinreichend für ein Gelingen. Es bedarf außerdem der Einhaltung gewisser Verfahrensgrundsätze, welche sowohl strukturelle Aspekte umfassen, wie die Organisation eines selbstlernenden Systems mit Haltepunkten, als auch qualitative Aspekte des Umgangs der Beteiligten miteinander, wie den produktiven Umgang mit Hierarchien²⁹, die Anerkennung des besseren Arguments (Deliberation) und die Einhaltung von Grundregeln der Zivilität im persönlichen Austausch. Folgende Befunde und daraus abzuleitende Verfahrensgrundsätze sind auf Basis der ITAS-Forschung festzuhalten³⁰: Partizipation ist mehr als eine Frage des kurzfristigen Interessenabgleichs. Die Entscheidungsfindung wird erheblich herausgefordert, da sehr unterschiedliche Schlüsselakteure diesen Typ von Realexperiment kontinuierlich prägen und mitbestimmen werden. Dazu gehören sowohl die politischen Schlüsselakteure als auch die von ihnen eingebundenen Regierungsorganisationen und Teile der politischen Administration, die im Mehrebenensystem sowohl fachpolitisch als auch bezüglich der Umsetzung von Partizipation die Entsorgung prägen. Eine umfassende Beteiligung zu unterschiedlichen Fachthemen und in unterschiedlichen Formaten wird von der Zivilgesellschaft und der antinuklearen Opposition (mit ihren vielfältigen Netzwerken und Organisationskernen) gefordert. Für diese partizipativen Prozesse sind Grundregeln festzulegen wie auch problemorientierte „Dialogforen“ zu schaffen, die die Vorbereitung von Entscheidungen und das „Denken in Alternativen“ (acatech, 2012, S. 9) ermöglichen. In diesen kann, unter Einhaltung von Verfahrensregeln (Deliberation), eine neue Endlager-Governance jenseits etablierter Routinen, die die Suche nach einer zeitgemäßen Entsorgungslösung aufnimmt, geschaffen werden.

²⁹Mit produktiven Hierarchien ist gemeint, dass im Sinne einer lernenden Organisation/Institution Hierarchien einerseits als notwendig anerkannt werden, diese andererseits jedoch veränderlich sind. Das bedeutet, dass insbesondere in Bezug auf die Zusammenarbeit zwischen Personen unterschiedlicher Hierarchiestufen Möglichkeiten einer strukturierten Kooperation und Koordination mit klaren Verantwortlichkeiten geschaffen werden.

³⁰Diese basieren auf Dokumentenanalysen und einer Auswertung der Forschungsliteratur, die sich mit dieser Schnittstellen-Problematik auseinandersetzt sowie auf den Ergebnissen der ITAS-ENTRIA-Fokusgruppen. Die empirischen Ergebnisse der Auswertung der Fokusgruppen befinden sich noch in Bearbeitung und werden im Jahr 2018 veröffentlicht (siehe unten).

Ein solcher Ansatz der Endlager-Governance, welcher auf problemorientierten Dialog und Partizipation setzt, berührt in besonderer Weise Fragen der Demokratie. Wenn die Endlager-Governance eine deliberative Ausrichtung erlangen soll, ist eine entsprechende ‚fachpolitische Kultur‘ zu entwickeln. Sie hat einerseits die faktischen demokratischen Erwartungen zu berücksichtigen und andererseits technokratisch ausgerichtete Strategien zurückzuweisen. Diese zu entwickelnde Kultur hat folglich sowohl Prozesse der Anerkennung von divergierenden Positionen und die Beratung derselben als auch die Zurückführung auf Argumente und begründbare Positionen sicherzustellen. Dafür fehlen bisher in der deutschen Entsorgungspolitik, trotz der Stärken etablierter demokratischer Öffentlichkeit³¹ und den in robusten Demokratien vorgesehenen „checks and balances“³², die neuen Foren und Ansatzpunkte im neuen Standortauswahlverfahren.

Diese „neuen“ Foren für Dialog und Behandlung der Sachfragen, die bereits in der Vergangenheit nicht zufriedenstellend geklärt wurden, sind eine zentrale Herausforderung, um die Schnittstellen zwischen formeller Standortauswahl nach Standortauswahlgesetz und mit der Legitimation des Bundestags, mit informellen Prozessen der Entscheidungsvorbereitung und der zivilgesellschaftlichen Beratung zu „koppeln“. Orte, an denen die „alte Entsorgungsdebatte“ ohne Standortauswahlgesetz geführt wurde, waren selten in die offizielle Entscheidungspolitik eingebunden. Zu diesen Orten gehörte in Deutschland die Evangelische Akademie Loccum, die phasenweise einmal jährlich einen wichtigen Ort des Austausches zwischen fast allen Interessenparteien darstellte. Mit dem neuen Standortauswahlgesetz veränderten sich die Balancen und es ist unklar, ob Veranstaltungen wie die in Loccum auf Dauer Foren der Debatte und auch Orte der Auseinandersetzung mit Argumenten garantieren können. Da die neuen Institutionen (wie BGE, BfE und NBG) sich nach unserer Analyse noch nicht klar im gesellschaftlichen Raum platziert haben, steht die Bildung der problemorientierten „Dialogforen“ für Stakeholder-Kommunikation wie auch erweiterter Kommunikation mit der allgemeinen Öff-

³¹ Demokratische Öffentlichkeit zeichnet sich trotz aller populären Kritik durch Massenmedien auch durch Teilöffentlichkeiten aus. Da Teilöffentlichkeiten sich um bestimmte Themen gruppieren, erreichen Massenmedien die Bevölkerung mit einer sehr großen Themenbreite und hohen Kontinuität an Berichterstattung.

³² Hier wir auf den Begriff von „checks and balances“ zurückgegriffen und nicht der Begriff der Gewaltenteilung angeführt. Bei „checks and balances“ wird die Dynamik der Interaktionen zwischen den verschiedenen gesellschaftlichen Institutionen in den Vordergrund gestellt, während bei der Gewaltenteilung von einer grundlegend vorhandenen Balance ausgegangen wird. Letztere kann aber primär in nationalstaatlichen Ordnungskontexten sichergestellt werden und wird durch globale Krisen (Finanzen, Migration, Erstarken populistischer Strömungen und Parteien etc.) regelmäßig außer Kraft gesetzt.

fentlichkeit noch aus. Eine qualitativ angemessene Gestaltung von Orten, dialogischen Arenen sowie Gremien der Kompromiss- und Konsenssuche hat also noch zu erfolgen, wenn auf deliberative Demokratie als Ergänzung gesetzt wird.

Koppeln meint hier, dass durch Koordination und proaktiver Kooperation die zentralen Akteure ein spezifisches Maß an sozialer Phantasie entwickeln, wie Interessen in dieser „lästigen Entsorgungsfrage“ zur Kenntnis genommen und gleichzeitig als nationale Aufgabe integrativ bearbeitet werden. Auch wenn die Endlagerkommission (2016) dafür erste Vorschläge macht, fehlt ein organisatorischer Kern, der diese Aufgabe der Integration der interessierten Öffentlichkeit übernimmt. Da ein gemeinsames Verständnis der „nationalen Aufgabe“ nicht nur das Bekanntmachen der Pläne bis 2031, der dafür (z. T. neuen) zuständigen Institutionen und „sachgerechter Informationen“ meint, ist ein vertrauenswürdiger Schlüsselakteur festzulegen. Das Nationale Begleitgremium (NBG) könnte diesen Prozess befördern, hat aber im Kern nicht die entsprechende Aufgabenbeschreibung. Bevor es zu einer Entwicklung einer zivilgesellschaftlich gestützten Pro-Endlager-Bewegung im Sinne kollektiver Mobilisierung kommen kann (Brunnengräber u. Hocke, 2014), braucht es ein Verständnis der notwendigen Schritte in diese Richtung.

Transparenz ist für einen solchen dialogorientierten Ansatz eine wichtige Voraussetzung. Sie ist aber nicht selbsterklärend und muss präzisiert und praktisch umgesetzt werden. Dabei ist einerseits sicherzustellen, dass der notwendige Arbeitsaufwand derjenigen, welche Informationen bereitstellen, zu bewältigen ist (Sender-Transparenz) sowie die Informationen von den Adressaten verarbeitet werden können (Empfänger-Transparenz) (Kuppler, 2017; Kuppler u. Hocke, 2012). Bezüglich der Transparenz von Entscheidungsprozessen ist insbesondere zu diskutieren, welche Elemente des Entscheidungsprozesses an sich vollständig transparent sein müssen in dem Sinne, dass beispielsweise Sitzungen öffentlich sind, und in welchen Fällen eine Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse hinreichend ist (Kuppler, 2017).

Auch in einem transparenten Verfahren werden Grundlagen von bisherigen Entscheidungsprozessen immer wieder in Zweifel gezogen. Aktuell geschieht dies z.B. bei den Sicherungs- und Sanierungsarbeiten in der Asse. Auch die kontrastierenden Meinungen in politischen Debatten können diesen Effekt haben, die Pros und Kontras, Gorleben im Verfahren zu behalten, wären dafür ein Beispiel. D.h. auch, dass das Expertenhandeln der Endlagerkommission nicht alle Differenzen ausräumen und eine herausgehobene Einigkeit in Grundfragen erzielen konnte (Grunwald, 2016a). Dissonanzen sowie sich fortschreibende Konflikte zwi-

schen Schlüsselakteuren werden zur Normalität der nächsten Jahre und vielleicht auch Jahrzehnte gehören. Mit diesen muss offen umgegangen werden, d. h. es bedarf einer institutionellen Sicherung gegen ein machtförmiges Schließen von offen gedachten Entscheidungsprozessen durch zuständige politische und administrative Akteure unter Negierung noch vorhandener Dissonanzen – eine solche Institution könnte bspw. das Nationale Begleitgremium sein. Dieses Gremium und seine aktuelle thematische Offenheit für verschiedene Unterthemen verweist auf Ansätze eines neuen Typs von Einrichtungen, mit einem klaren Auftrag in einem staatlichen koordinierenden und kooperierenden Governance-Gefüge. Allerdings müssen solche neuen Einrichtungen erst Orte für „checks and balances“ werden, die mindestens mittelfristig von einem sich etablierenden breiteren, sichtbaren und voraussichtlich auch massenmedial zu verfolgenden Dialog begleitet werden.

Wissenschaftsbasiertes Handeln wird als ein Argument angeführt, das willkürliche und argumentativ nicht ausreichend unterfütterte Entscheidungspfade verhindern soll (vgl. (Endlagerkommission, 2016, S. 22f)). Als Leitidee verspricht es Handlungsmuster jenseits tagespolitischer Prioritätensetzung und – abstrakter formuliert – auch die Verringerung der Kontingenz von Entscheidungen und Korrekturen an eingeschlagen Entscheidungsrichtungen. Expertengutachten (wie das der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016 oder des AkEnd 2002) besitzen heute im Vergleich zu den 1960er und 1970er Jahren einen höheren Stellenwert und die Auseinandersetzungen um die zivile Nutzung der Kernenergie inkl. der Entsorgungsfrage mit ihren Risiken spielten dabei eine besondere Rolle (Grunwald, 2010b, S. 155). Das soziologische Konzept der Wissensgesellschaft verweist auf dieses Merkmal spätmoderner Gesellschaften (Stehr, 2001; Junge, 2008). Heute ist zwar einerseits bekannt, dass Experten keineswegs einer Meinung sein müssen. Dies gilt auch dann, wenn ihre Expertise sich auf den gleichen Bereich bezieht (Grunwald, 2010b, S. 155). Allerdings bereitet es bei kollektiv verbindlichen Entscheidungen (wie der nach dem richtigen Entsorgungskonzept und den dahinter stehenden Argumenten) sowohl der interessierten Öffentlichkeit (mit ihren Assoziationen und etablierten Stakeholdern) als auch der allgemeinen Öffentlichkeit Schwierigkeiten, sich mit diesen Differenzen auseinanderzusetzen. Dies wird in der Fachliteratur als „Expertendilemma“ bezeichnet³³.

Zur Bearbeitung des Expertendilemmas bedarf es der Entwicklung „problembezogener Urteilskraft“. Die Verweise auf Wertneutralität und die

³³Ausführlich dazu (Grunwald, 2010b, S. 155-157), (Bogner u. Torgersen, 2005, S. 8-14) und Wassermann (2015).

notwendige Unterscheidung zwischen objektiven und nicht-neutralen wissenschaftlichen Positionen durch das Wissenschaftssystem selbst erscheinen meist wenig ertragreich („honest broker“, Pielke (2007)). Die Rolle der Wissenschaft beim Umgang mit Risikotechnologien ist selbst Teil tagespolitischer Auseinandersetzung. So entsteht ein Spannungsfeld, in dem unterschiedliche Positionen in Fachfragen nicht eindeutig von Fragen der Ethik und der Politik differenziert werden können. Dieses Spannungsfeld muss in einer deliberativen Endlager-Governance thematisiert werden. Seine Entschärfung hängt sowohl vom zivilen, konfliktreduzierenden Auftreten einschlägiger Expertenteams als auch der Wissenschaftskommunikation selbst ab. Auch Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft müssen dabei mit einer gewissen Kontinuität Interesse an der konstruktiven Problemlösung zeigen. Dass sich die besseren Argumente durchsetzen können, wird folglich von der Interaktion und der themenspezifischen Konsenssuche der beteiligten Akteure abhängen. Wissenschaft, Politik und Administration haben die Rolle, auf Fragen der fachlich interessierten als auch der allgemeinen Öffentlichkeit Antworten anzubieten. Ob diese Hegemonie und Mobilisierungskraft entwickeln können, lässt sich nicht prognostizieren. Vielmehr ist davon auszugehen, dass es sich um einen fortschreitenden Suchprozess mit Schleifen und fallweiser Stagnation handeln wird. Bei dem Suchprozess für ein robustes und reflektiertes Verfahren werden die Schlüsselakteure vor besondere Herausforderungen gestellt. Gerade weil sie aus verschiedenen Teilsystemen kommen, müssen sie im Rahmen des novellierten Standortauswahlgesetz ihre Argumente, Prämissen und Vorstellungen zu den angemessenen technischen und sozialen Problemlösungen auf den Tisch legen und deliberativ weiterentwickeln. Nur so können argumentgestützte Aushandlungen und Entscheidungen vorbereitet werden. Dazu dienen insbesondere auch die öffentlichen problemorientierten „Dialogforen“. Allerdings wird das Wissensfundament (inkl. des wissenschaftlichen Wissens) immer in einer besonderen Weise prekär bleiben, so die Erfahrung der Technikfolgenabschätzung. Das Prekäre an diesem Wissensfundament mit seinen speziellen Ungewissheiten, die in Konzepte wie die geologische Tiefenlagerung eingeschrieben sind, wird durch zwei Aspekte bestimmt, die hier nur angerissen werden können: 1) der erschwerten Folgenreflexion, 2) der Vorgeschichte der jeweiligen Technologie³⁴. Die-

³⁴Bereits die Folgenreflexion von technisch-konzeptionellen Grundsatzentscheidungen bei der Suche nach einem plausiblen Entsorgungskonzept führt auf einer neutralen Wissensbasis nicht zu gut verständlichen Auskünften über die nicht-intendierten Folgen der bisher geleisteten Endlagerforschung. Häufig finden auch Abschätzungen dieser Folgen bei Fachgesprächen – so unsere Ergebnisse teilnehmender Beobachtungen – nicht zu weitgehend geteilten Beurteilungen. Einschränkend muss hier hinzugefügt werden,

sen zwei Aspekten wird in der allgemeinen Technikforschung und der nuklearen Entsorgungsforschung zu wenig Aufmerksamkeit gewidmet. Werden diese Aspekte jedoch nicht ausreichend berücksichtigt, wird eine innovative Endlager-Governance nur schwer zu verwirklichen sein. Im Hinblick auf den zukünftigen Bedarf an Entsorgungsforschung sind eine Reihe von epistemologischen Herausforderungen für eine problem- und folgenorientierte Forschung zu berücksichtigen.

Neben der Grundlagenforschung benötigt eine national reflektierte Governance (a) die genaue Definition des analytisch zu behandelnden Problems, (b) die Wahl von angemessenen Schlüsselbegriffen, (c) die Klassifikation des Forschungsfeldes, (d) die Definition der Grenzen des zu betrachtenden Systems sowie (e) Relevanzbetrachtungen zu den Wechselwirkungen innerhalb dieses Problems³⁵. Die ENTRIA-Governance-Forschung hat dafür sowohl im Hinblick auf den internationalen Vergleich als auch auf eine Reihe von Grundfragen wichtige interdisziplinäre Grundlagen gelegt und zur Diskussion gestellt (siehe Kap. 3.7 und Kap. 5.2.3).

Ein offizieller Entscheidungspfad, der diese Entwicklungen stützt, erscheint nicht unmöglich. Die teilnehmenden Beobachtungen unseres und weiterer Forschungsteams während und nach den Arbeiten der Endlagerkommission zeigen, dass trotz der Widrigkeiten und des Zeitdrucks bei den damit zusammenhängenden Entscheidungsabläufen, im Kern der interessierten Öffentlichkeit und bei zentralen kollektiven Akteuren eine nicht zu unterschätzende Bereitschaft zur konstruktiven Zusammenarbeit vorhanden ist³⁶. Dies müsste aber – so eine Erfahrung aus der Vergangenheit – staatlicherseits auch kontinuierlich gefördert werden. Das zu lösende Problem ist nicht nur ein „vertracktes“ („wicked problem“, vgl. Kap.5.2.3), sondern auch eines der zukünftigen Governance.

Allerdings bewegen sich Governance-Bemühungen, die auf diese Herausforderung reagieren und damit gekoppelte deliberative Formate (wie Dialogforen) einsetzen, in fallspezifische Spannungsfelder hinein. Diese

dass keine sehr gute Datenbasis als Beleg vorliegt. Zugrunde liegen dieser Einschätzung Notizen in den Arbeitsjournalen Hocke und erste Auswertungen zu Experteninterviews in der ersten Projekthälfte, die nicht vertieft werden konnten.

³⁵Vgl. dazu Grunwald (2010b).

³⁶Die ersten ITAS-Auswertungen zu einem Fokusgruppenprojekt zeigen deutlich, dass Teile der engagierten Öffentlichkeit in experimentellen Situationen durchaus bereit sind, soziale Phantasie zu entwickeln und in Gruppendiskussionen ungewöhnliche Ideen zu entwickeln. Eine davon ist, dass die Mitarbeit in Beteiligungsgremien nicht immer auf ehrenamtlichem Engagement fußen muss. Auch Lösungen mit einem Schöffen-Modell wären vorstellbar, um eine in der Gruppendiskussion entwickelte Idee anzuführen. Dies würde allerdings auch voraussetzen, dass federführende Fachbehörden und parlamentarische Politik bei der Durchsetzung eng mit der Zivilgesellschaft zusammenarbeiten und entsprechend die interessierte Öffentlichkeit mobilisiert.

Spannungsfelder sind im ENTRIA-Memorandum (Röhlig u. a., 2014) bereits beschrieben und werden sich nur durch strategisches und unterstütztes Handeln staatlicher, transdisziplinär-wissenschaftlicher und zivilgesellschaftlicher Akteure behandeln lassen. Dazu bedarf es selbstredend ausreichender Ressourcen sowie Zeit und Willen zur Koordination bei den verantwortlichen Schlüsselakteuren. Nur so kann es gelingen, auch in politisch innovative Formate zu investieren. Wenn die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle und Reststoffe im Kontext eines sich-selbst-hinterfragenden und selbstlernenden flexiblen Systems mit Haltepunkten und Optionen für Rückschritte, bei denen niemals das Entsorgungsziel zurückgestellt wird, gedacht wird³⁷, so bedeutet dies mehreres: (a) schrittweise sicherheitstechnische und zivilgesellschaftlich ausgerichtete Maßnahmen, Dialoge und Orte der Reflexion zu entwickeln, (b) diese Orte an Entscheidungsprozesse anzukoppeln und (c) Unterstützung durch Endlager-Experten und unabhängige akademische Wissenschaft zu sichern.

Die bisherige Entsorgungsgeschichte ist für die Schnittstellengestaltung, die hier umrissen wird, kein Paradebeispiel. Aber die aktuellen Chancen zur Bewältigung der bekannten Dilemmata wie Ressourcenarmut oder eingeschränkter Offenheit gegenüber einer eigenwilligen Zivilgesellschaft liegen auf dem Tisch. Die Gestaltung von Zukünften, das Denken in Alternativen und die Entwicklung vorurteilsfreier Urteilskraft für die Gegebenheiten der aktuellen Entsorgungslage inkl. der gesellschaftlichen Erwartungen eröffnen Perspektiven. Ihnen zu folgen und gleichzeitig auf gute Wissenschaft und Expertise zu setzen, dürfte nicht unmöglich sein. Deliberative und demokratisch angepasste Governance-Prozesse könnten also die öffentliche Debatte (auch über die unbequemen Seiten der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle) aufnehmen, Widersprüche zulassen, die diskursive Anerkennung von widersprüchlichen Aussagen sicherstellen und anschließend diese professioneller Bearbeitung zugänglich machen. Dies setzt Urteilskraft und administrative Bereitschaft voraus, die sicher eine erhebliche Herausforderung für die Akteure darstellt, die für das Schnittstellen-Management zuständig sind oder im besten aller Fälle wären.

Governance und Multi-Level-Governance

Das Ziel des Teilprojektes bestand zum einen in der politik- und sozialwissenschaftlichen Analyse der Entwicklung einer Entsorgungsstrategie für

³⁷ Dies ist eine Zusammenfassung der Stoßrichtung, die der Abschlussbericht der Endlagerkommission aus unserer Sicht formuliert, vergleiche die Passage zu Partizipation, (Endlagerkommission, 2016, S. 39ff.).

nukleare Abfälle in der Bundesrepublik unter Beteiligung der relevanten Stakeholder. Neben der Identifikation der Schlüsselakteure und Interessen, ihrer Wertesysteme, Ansichten und Erwartungen, d. h. der Endlager-Governance, wurden Wege für konstruktive Dialoge und Ansätze zur Problemlösung untersucht. Einen Schwerpunkt bildete hierbei die Analyse von Akzeptanzfragen und Konfliktlagen sowie deren Regelungsmechanismen. Zum anderen wurde eine international vergleichende Analyse der Endlagerungs-Governance im Mehrebenen-System unter besonderer Berücksichtigung von Politikinstrumenten und Institutionen durchgeführt, die „lessons for policy“ liefert. Die Determinanten für Erfolg und Misserfolg der analysierten Instrumente wurden im internationalen Kontext verglichen und bewertet. Erfahrungen mit „best practice“ Charakter sind in die Formulierung von Politikempfehlungen eingeflossen. Alle fünf FFU-Module hatten Querverbindungen zu weiteren ENTRIA-Teilprojekten, so dass vielfältige interdisziplinäre Schnittstellen vorhanden waren.

Modul 1: Akteursanalyse. Modul 1 diente der Identifikation von Schlüsselakteuren, den vorhandenen Akteurskonstellationen und deren Interessen, ihrer Wertesysteme und Positionen sowie der Sondierung, ob und in welchem Ausmaße es strukturell bedingte Hemmnisse für konstruktive Dialoge und Ansätze zur Problemlösung gibt. Dazu wurde ein auf Kriterien basiertes Analyseraster entwickelt und die Charakteristika der Akteursgruppen synoptisch dargelegt. Das Akteursscreening ergab, dass von der großen Zahl an der Entsorgungspolitik beteiligter kollektiver Akteure viele als nur wenig bekannt einzustufen sind. Beim Erfassen ihrer Profile zeigte sich, dass Interessen, Wertesysteme und Positionen zum Teil weit auseinanderliegen. Die rund 300 identifizierten Akteure sind in den Akteursgruppen der politischen / staatlichen Institutionen (56), wissenschaftlichen Einrichtungen (29), der Wirtschaft (33) sowie der Sozialen Bewegungen und Umwelt-NGO (176) gefasst. In der Gruppe „Sonstige“ sind vor allem Akteure (insgesamt 22, z. B. elf Anwaltskanzleien) dargestellt, die keine gemeinsamen Gruppen-Perspektiven und Rationalitäten in Bezug auf die „Endlagerung“ entwickeln (Häfner, 2016b).

Auch die deutsche Akteurslandschaft im Bereich der privatwirtschaftlichen Akteure befindet sich in einem Umbruch. Da die Energieversorgungsunternehmen aufgrund der Energiewende an Einfluss verloren haben, verbleiben zunächst die politischen Institutionen des Staates und der Zivilgesellschaft als relevante Gruppen im Aushandlungsprozess einer neuen Endlager-Governance. Hierbei besitzen die beiden Akteursgruppen lediglich begrenzte Steuerungsmöglichkeiten und gerade zwischen diesen Gruppen verläuft die ausgeprägte Konfliktlinie der För-

derung und Ablehnung der „friedlichen Nutzung der Kernenergie“. Damit geht mit Blick auf die Akteurslandschaft eine Komplexitätsreduktion einher. Die Komplexität bleibt aber im Bereich der Prozesse und Diskurse bestehen, weshalb eine Moderation der Prozesse und Diskurse der Endlagerstandortsuche geboten erscheint, die von neutralen Institutionen durchgeführt werden sollte, um die alten Konfliktlinien zu überwinden (Häfner, 2016b, S. 184f). Bei der Analyse politik-ökonomischer Konfliktkonstellationen wurde darüber hinaus herausgearbeitet, dass sich diese stark verändern oder sich sogar auch auflösen beginnen (Brunnengräber u. Mez, 2016). Auf Grund der unkalkulierbaren Risiken bei der Umsetzung einer tiefengeologischen Entsorgungsstrategie waren die Energieversorgungsunternehmen an einer zügigen und rechtlich verbindlichen Regelung interessiert, die das Konfliktniveau – auch für zukünftige Prozesse – deutlich absenkte. Gleichzeitig wurden aber die finanziellen Risiken der Steuerzahlerin und dem Steuerzahler überantwortet. Alle Mehrkosten müssen nun vom Staat bezahlt werden.

Modul 2: Akzeptanz und Konflikte. In Modul 2 wurden unterschiedliche Dimensionen von Akzeptanz und Konflikten bei der Suche nach einem Standort für radioaktive Abfälle sowie die Wahrnehmung unterschiedlicher Akteure und (potentiell) Betroffener untersucht. Konflikte um Akzeptanz bzw. Zustimmung wurden in einer Reihe von relevanten Industrieländern sondiert.

Bei der Analyse von Akzeptanzproblemen und Konfliktlagen zeigte sich, dass die unterschiedlichen Risikowahrnehmungen von erheblicher Bedeutung sind. Die jahrzehntelangen Auseinandersetzungen zwischen staatlichen Institutionen und der Anti-Atom-Bewegung verweisen insbesondere auf drei Problemstellungen der deutschen Endlager-Governance: erstens eine deutlich unterschiedliche Risiko- und Gefahrenwahrnehmung verschiedener Akteure, zweitens das entstandene Misstrauen zwischen Teilen der Zivilgesellschaft und staatlichen aber auch wissenschaftlichen Institutionen und drittens die bestehenden Unsicherheiten bei der Einlagerung und die langen Zeiträume der Problembearbeitung.

Bei der Untersuchung der Gesichtspunkte „Akzeptanz“ und „Konflikte“ in der Standortsuche für ein Endlager zeigte sich am Beispiel der Anti-Atom-Bewegung, dass zum einen ein historisch „gewachsenes“ Konfliktpotential vorhanden ist, zum anderen aber auch ein „window of opportunity“ für neue Verständigungs- und Politikansätze besteht (Brunnengräber, 2013; Brunnengräber u. Häfner, 2015). Um zu einer zielführenden Entsorgungspolitik zu kommen, scheint die Entwicklung einer „Pro-Endlager-Bewegung“ als wichtiger Zwischenschritt (vgl. Brunnengräber

u. Hocke (2014)). Die Endlagerkommission wurde als ein erster Bestandteil auf diesem Weg identifiziert. Zugleich haben die staatlichen Instanzen hinsichtlich der politischen Regulierung die Kompetenzen auf der Bundesebene konzentriert und die Zivilgesellschaft nur ansatzweise in die Prozesse eingebunden (Brunnengräber u. Syrovatka, 2016).

Modul 3: Governance im Mehrebenen-System. In Modul 3 wurden Mehrebenenprozesse in der Endlager-Governance betrachtet, die von der lokalen über die regionale bis zur nationalen und internationalen Handlungsebene reichen. Sie wurden auf strukturell bedingte Interdependenzen, Hemmnisse und Problemlösungsansätze hin untersucht.

Eine Standortsuche für ein Endlager stellt weltweit ein vertracktes Unterfangen dar. In Anlehnung an frühe Überlegungen von Rittel u. Webber (1973) sowie Tatham u. Houghton (2011) wurden zehn Charakteristika für das „wicked problem“ der Endlagerung zusammengestellt: (1) der weite Kontext, (2) die wechselnden Narrative, (3) die sozio-technische Herausforderung, (4) die doppelte Gefahrenlage und die Kosten, (5) das systemische Risiko, (6) die unüberschaubaren Zeitskalen, (7) die verknüpften Ebenen, (8) die konfliktive Akteurslandschaft, (9) die Grenzen der Wissenschaft und (10) die herausgeforderte Demokratie (Brunnengräber, 2016a). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Endlagerung ein komplexes Mehrebenenproblem darstellt, das in ENTRIA reinterpretiert und zugespitzt wurde (s. zu dieser Zuspitzung auf vier Charakteristika Kap. 3.7.2).

Wird das „wicked problem“ als ineinandergreifendes stoffliches, technisches und soziales Demokratieproblem erfasst, müsste die Bearbeitung des Problems konzeptionell verändert werden. Die Positionen aller am Prozess interessierten Akteure in ihrer Vielfalt und Unterschiedlichkeit müssten festgestellt, beraten und verhandelt werden, um auf eine neue Bearbeitungsform mit der Chance auf Konfliktlösung zuzugehen. Dem Top-down-Ansatz und dem dominierenden Problemdiskurs stehen ganz unterschiedliche politische und sozio-ökonomische Notwendigkeiten entgegen, die von den betroffenen Regionen, Städten und Kommunen vorgebracht werden. Mit einem einheitlichen, primär technisch ausgerichteten Lösungsansatz kann kaum angemessen auf diese Notwendigkeiten reagiert werden. Sozioökonomische und politische Ungleichheiten, eine ungleiche Ressourcenverteilung und ungleiche Zugangsmöglichkeiten zu Entscheidungsprozessen müssen in der Konsequenz systematisch in die politische Problembearbeitung integriert werden (Brunnengräber u. Di Nucci, 2017).

Für „wicked problems“ gilt generell, dass die Probleme nur äußerst schwer durchdrungen und gelöst werden können. Bereits die Problemdefinition, die gesellschaftliche Wahrnehmung und auch die mediale Aufbereitung des Problems sind höchst divergent: Für die Bevölkerung in der Region, in der ein Endlager projektiert wird, stehen das Risiko, die Gesundheit oder Grundstückspreise im Vordergrund; für die Energieunternehmen die Kosten, die zu veranschlagen sind; für die Behörden und Ministerien die Verständigung auf politische Verfahren und Institutionen (Brunnengräber u. a., 2014a, S. 397). Dabei sind vor allem Akteure durchsetzungsfähig, die politisch und aufgrund ihrer Ressourcen in der Lage sind, Einfluss auf die Standortsuche für ein Endlager zu nehmen. Je nach Perspektive können sich die Präferenzen, Interessen, Handlungslogiken und Vorstellungen etablierter politischer Akteure und der Zivilgesellschaft voneinander unterscheiden oder gegensätzlich sein und doch müssen sie – um „wicked problems“ zu lösen – im politischen Prozess zusammengeführt werden (ebd.). Somit rückt die Suche nach dem richtigen Weg, der von der Verfahrensgerechtigkeit geleitet wird, in den Vordergrund (Brunnengräber, 2016a, S. 163).

Modul 4: Internationaler Vergleich. In Modul 4 wurden Governance-Strukturen und Formen der Öffentlichkeitsbeteiligung in verschiedenen Ländern analysiert, ausgewertet und verglichen. Zu einzelnen Ländern wurden vertiefende Fallstudien durchgeführt. Sie wurden in Bezug auf die Fragestellung des Vergleichs und der Übertragbarkeit (der „lessons learnt“) auf die Bundesrepublik Deutschland sekundäranalytisch betrachtet. Eines der wichtigsten Ergebnisse dieses Moduls ist die Herausgabe des Sammelbandes „Nuclear Waste Governance“ (Brunnengräber u. a., 2015a) mit Erfahrungen aus dreizehn Ländern, der 2018 um einen weiteren Band ergänzt wird (Brunnengräber u. a., 2018).

Bei Untersuchungen zum Spannungsfeld von Konfrontation und Kooperation zeigte sich, dass nationale Wege sehr spezifisch ausgelegt und nur bedingt auf andere Länder übertragbar sind (Brunnengräber u. a., 2015a; Di Nucci u. a., 2017). Dennoch konnten durch den Vergleich und die Synthese der Länderstudien insbesondere auch aus volkswirtschaftlicher Perspektive einige konfliktverschärfende wie konfliktminimierende Faktoren bei der Standortsuche identifiziert und bewertet werden. So wurden Freiwilligkeit und die umstrittene Rolle von Kompensationen sowie die unterschiedlichen Ausformungen derselben eingehend in den Blick genommen (Di Nucci u. a., 2017; Brunnengräber u. Di Nucci, 2017). Weiterhin wurde diskutiert, inwiefern soziokulturelle Faktoren wie „Vertrauen“, aber auch „Transparenz“ bei Entscheidungsprozessen für eine erfolgreiche Stand-

ortsuche ausschlaggebend sein können. Dabei wurde auf die Erfahrung der Länder zurückgegriffen, die in einer fortgeschrittenen Phase des Suchprozesses sind und deren Lösungsansätze komparativ analysiert wurden (Di Nucci, 2016; Di Nucci u. a., 2017).

Internationale Empfehlungen, Regeln, Richtlinien, Sicherheitsstandards und Vorgaben für den Umgang mit radioaktiven Abfällen sowie bilaterale Verträge einzelner Länder verdeutlichen, dass nationale Entsorgungsprogramme in eine komplexe Mehrebenenpolitik eingebettet sind, die auf nationaler Ebene fortgeschrieben wird (Brunnengräber, 2015, S. 89). Die Verantwortung für eine sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle liegt zwar beim Staat, doch auch auf nationaler Ebene existieren Besonderheiten im politischen Verhältnis von Bund, Ländern, Regionen oder Kommunen, weshalb die Atompolitik in der Bundesrepublik seit jeher auch von Kompetenzstreitigkeiten zwischen Bund und Ländern geprägt ist, die sich u. a. auf das Problem der Zwischenlagerung beziehen (ebd.: S. 89). Die Deutung von Problemen, die Verteilung von Kompetenzen, Ressourcen, Aufgaben und letztendlich von Entscheidungsbefugnissen auf unterschiedlichen Handlungsebenen (national, sub-national oder international) sowie die stoffliche Seite des Problems wurden hierbei in einem Wirkungszusammenhang analysiert und als anhaltend konfliktgeladen beschrieben.

Eingehend analysiert wurden auch die internationalen und supranationalen (europäischen) Rahmensetzungen (Di Nucci u. a., 2015). Dabei wurde nach der Bedeutung der Richtlinie 2011/70/EURATOM (Europäischer Rat 2011) und den Möglichkeiten für internationale Lösungen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle gefragt. Die Richtlinie weist den Mitgliedsstaaten zwar die abschließende Verantwortung für die Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle zu, enthält letztlich aber auch Schlupflöcher, die gemeinsame internationale Lösungen erlauben. Dies wird am Beispiel der gemeinsamen Lösungen ausgeführt, die innerhalb der European Repository Development Organisation diskutiert werden.

Modul 5: Politikinstrumente und Institutionen. In Modul 5 lag der Fokus auf der Analyse der Politikinstrumente und Institutionen im Standortauswahlprozess. Diese legte den Schwerpunkt auf den Instrumenten-Mix und die damit verbundenen institutionellen Konfigurationen. Die Analyse beinhaltete die Rolle und Funktionen der verschiedenen staatlichen wie nicht-staatlichen Einrichtungen, insbesondere auch derjenigen, die durch das Standortauswahlgesetz implementiert wurden. Dabei ging es um die Frage der Legitimation und demokratischen Gestaltung sowie um die Machbarkeit und Durchführbarkeit der Maßnahmen und Prozesse.

In den letzten fünf bis zehn Jahren hat sich ein entscheidender Paradigmenwechsel vollzogen, durch den die sozialwissenschaftlichen Belange auf dem Gebiet der nuklearen Entsorgung einen höheren Stellenwert haben und Fragen der Teilhabe sowie Transparenz eine größere Aufmerksamkeit geschenkt wird (Bergmans u. a., 2015). Darin spiegelt sich nicht zuletzt die Erkenntnis wider, dass eine begleitende, inklusive Kommunikation und Partizipation am Standortsuchverfahren eine zwingende Notwendigkeit darstellt (Brans u. a., 2015). Ein breiter gesellschaftlicher Dialog und eine stärkere Einbindung der Öffentlichkeit werden heute als Voraussetzung für die Annäherung an einen erfolgsversprechenden Umgang mit dem „wicked problem“ der Endlagerung angesehen (Brunnengräber u. Di Nucci, 2017, S.141).

Eine Ausweitung der Öffentlichkeitsbeteiligung muss schließlich mit der Abgabe von Kompetenzen, der Anerkennung gegenteiliger Meinungen und unterschiedlicher Expertisen sowie dem Ressourcentransfer einhergehen, durch den die Bevölkerung, Bürgerinitiativen oder Umweltorganisationen überhaupt erst in die Lage versetzt werden, sich an dem anspruchsvollen Vorhaben zu beteiligen. Unter Öffentlichkeit oder Betroffenen sind keineswegs nur diejenigen zu fassen, die im Umfeld eines möglichen Standortes leben, sondern all diejenigen, die sich ‚betroffen‘ fühlen oder deren Interessen berührt werden (Brunnengräber, 2016a, S. 161).

Aufgrund der Konfliktkonstellationen sind aber trotz aller Bemühungen nur Annäherungen an die Ideallösung, so genannte „clumsy solutions“ (Verweij u. Thompson, 2006), realistisch, durch die die Interessen, Wertvorstellungen und Positionen der unterschiedlichen Akteure ausbalanciert werden müssen ((Brunnengräber u. a., 2014b, S. 396), vgl. auch (Di Nucci u. Isidoro Losada, 2015, S. 29)). Das verlangt allen Akteuren Kompromisse ab. Aufgrund tiefgehender Differenzen bei Werten, Interessen und Präferenzen der Akteure, die unterschiedliche Ansichten zum Verfahren wie zu den erwünschten Ergebnissen haben, sind allerdings auch neue Konflikte unvermeidbar. Es handelt sich nicht zuletzt um Probleme, bei denen es zu negativen Rückkopplungsschleifen kommen kann. Durch Ansätze einer erweiterten Öffentlichkeitsbeteiligung könnten repräsentative, deliberative und partizipative Elemente der Demokratie so miteinander verknüpft werden, dass der Prozess der Standortsuche als fair und gerecht angesehen wird.

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle wird in jedem Fall eine neue Qualität der Handlungen von demokratischen Institutionen erfordern (siehe auch Kapitel 5.2.5). Letztlich geht es um eine Reduzierung hierarchischer Verhältnisse, eine Verlagerung der Zuständigkeiten und eine Einbindung ziviler Wissensbestände und Erfahrungswerte. Dies scheint nur im Rah-

men robuster und neutraler Langzeit-Institutionen realisierbar, die die Endlagerung als kontinuierlichen Prozess von Politik, Recht und Gesellschaft organisieren und – weit über die Wahlperioden hinaus – auf Dauer fortführen (Brunnengräber, 2016b, S. 161f). In Anbetracht der Planungshorizonte, um die es bei der Atommüll-Thematik geht, wird es in Zukunft noch viele weitere Gremien wie die Endlagerkommission geben (müssen) – auch mit anderen und neuen Akteuren (Kalmbach, 2016, S. 406).

5.2.4 Auswertung internationaler und nationaler Erfahrungen (Promotionsvorhaben)

Im Modul ITAS-D arbeitet das Karlsruher Team mit dem der FFU zusammen. Bei den Ländervergleichen zeigte sich, dass die bisherige international-vergleichende Forschung in den Politikwissenschaften die Strukturen nationaler Entsorgungspolitiken der neueren Zeit analytisch nur schwach systematisiert hat und gerade die zeitgeschichtlichen Aspekte und energiewirtschaftlichen Entscheidungsstrukturen nur wenig aufgearbeitet sind. Letzteres gilt nicht nur für Deutschland, sondern auch für entsorgungspolitisch zügig fortschreitende europäische Staaten wie die Schweiz (siehe Abschnitt 5.2.4) und Schweden (siehe Abschnitt 5.2.4). Die Studien zur Schweiz und zu Schweden zeigen, dass Ergebnisse insbesondere in Bezug auf Partizipation und damit neueren Governance-Strukturen auf Deutschland übertragbar sind und insofern Lernprozesse anstoßen können³⁸.

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der folgenden vier Promotionsvorhaben vorgestellt:

- Sophie Kuppler: Governance-Erfahrungen aus der Schweiz (2012-2017)
- Nele Wulff: Der Umgang mit Nicht-Wissen in Schweden (seit 2014)
- Cord Drögemüller: Entsorgungsoptionen aus Sicht kommunaler und lokaler Akteure (2013-2017).
- Daniel Häfner: Betroffenheit(en) im Umfeld kerntechnischer Anlagen (seit 2014)

Kuppler (2016) kommt zu dem Schluss, dass die Vergleichbarkeit zwischen der Schweiz und Deutschland vorhanden ist, wenn mittels „process tracing“ (George u. Bennett, 2005) Kausalketten konstruiert und

³⁸Die Kritik an Vergleichsstudien hinsichtlich der Übertragbarkeit von Endlagerpolitiken der Schweiz auf Deutschland wird von Kuppler (2017) aufgenommen und aufgearbeitet.

„functional equivalents“ (Fontana u. a., 2008) herausgearbeitet werden. Aus dieser Forschungsperspektive ließen sich Merkpunkte für Deutschland ableiten, beispielsweise bezüglich der Transparenz und Flexibilität von Verfahren (Kuppler, 2016)³⁹. Die Perspektiven kommunaler Entscheidungsträger und lokaler Akteure in Bezug auf die Vor- und Nachteile der deutschen Entsorgungspolitik werden in Kapitel 5.2.4 dargestellt.

Governance-Erfahrungen aus der Schweiz

Vor dem Hintergrund der konfliktbehafteten Historie der Entsorgung nuklearer Abfälle, die bis in die Gegenwart andauert und dazu geführt hat, dass partizipative Elemente in der Entscheidungsfindung propagiert werden, gleichzeitig jedoch kritisiert wird, dass es sich mehr um eine Konfliktbefriedung handelt denn um wirkliche Mitsprachemöglichkeiten, wurde in dieser Dissertation zwei Fragen nachgegangen: Erstens, ob die Ausrichtung von Dialogveranstaltungen („mikro-deliberative Ereignisse“) bereits zu Änderungen in der Endlagerpolitik und im massenmedialen Diskurs über diese führt, und zweitens, welche Faktoren sich als fördernd und welche als hemmend für die Entstehung solcher Effekte erweisen. Diese Analyse wurde vergleichend anhand des deutschen und des Schweizer Falls durchgeführt. Untersucht wurde der Zeitraum 2001 bis 2010, in welchem in der Schweiz ein neues Standortauswahlverfahren zur Implementierung kam, während in Deutschland ein Versuch einer Neuausrichtung der Standortsuche stattfand, die dann aber nicht realisiert wurde.

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde Regieren als Handeln von Akteuren konzeptualisiert. Verschiedene Regierungsstile in der Entsorgungspolitik unterscheiden sich unter anderem anhand der Bandbreite der kollektiven Akteure, die in die Vorbereitung von Entscheidungen mit einbezogen werden, und der Qualität des Einbezugs. Anhand dieser und weiterer Kriterien wurden basierend auf Literatur zu „Governance“ und „Deliberation“ (insb. Haus (2010); Habermas (1992)) zwei Idealtypen des Regierens identifiziert: Endlager-Management und deliberative Endlager-Governance. Endlager-Management steht für einen stark an administrativen Vorgängen und damit an Verwaltungshandeln ausgerichteten Politikstil, in dem die interessierte Öffentlichkeit nur einen sehr begrenzten Zugang zur Entscheidungsvorbereitung hat und bereits zu Beginn des Verfahrens feststeht, was als „gutes Regieren“ angesehen wird. Deliberative Endlager-Governance hingegen steht für einen Politikstil, bei welchem die interessierte Öffentlichkeit in die Entscheidungsvorbereitung mit ein-

³⁹Für Deutschland siehe Hocke u. Kallenbach-Herbert (2015); zur Schweiz Hocke u. Kuppler (2015); Kuppler (2017).

bezogen wird und Aushandlungsprozesse darüber stattfinden, was „gutes Regieren“ und ein „gutes Ergebnis“ im Fall der Endlagerung bedeuten. An der Bewegung zwischen den für diese beiden Idealtypen festgelegten Kriterien wurden Effekte mikro-deliberativer Ereignisse ausgemacht.

Sowohl in Deutschland als auch der Schweiz sind Effekte mikro-deliberativer Ereignisse zu beobachten und damit Bewegungen hin zu deliberativer Endlager-Governance. Beispiele hierfür sind die erhöhte Pluralität in den Entscheidungsfindungsstrukturen und zumindest teilweise Einigung darüber, dass ein neues Standortauswahlverfahren benötigt wird. In Deutschland ist die Endlagerpolitik jedoch weiterhin stark im Endlager-Management verhaftet und zeigt nur temporär begrenzte Bewegungen in Richtung deliberativer Endlager-Governance. In der Schweiz sind dagegen zentrale Aspekte dieses Politikstils umgesetzt, gleichzeitig finden sich aber weiterhin starke Elemente des Endlager-Managements. In beiden Ländern ist der Wandel durch die jeweilige Demokratieform geprägt, d. h. in Deutschland durch die repräsentative Demokratie und den Föderalismus, in der Schweiz durch die Konkordanz-Demokratie. Obwohl die Entsorgungspolitiken Deutschlands und der Schweiz auf den ersten Blick sehr unterschiedlich sind, zeigte sich im Vergleich, dass es durchaus große Ähnlichkeiten darin gibt, welche Faktoren die Entstehung von Effekten mikro-deliberativer Ereignisse beeinflussen. Ein zentraler Faktor ist die institutionelle Ausgestaltung von Interaktionen zwischen kollektiven Akteuren im Verfahren und wie diese qualitativ umgesetzt werden, d. h. ob „Räume“ geschaffen wurden, in denen sich beispielsweise die interessierte Öffentlichkeit mit Vertretern der Entsorgungsorganisationen und der Behörden informell austauschen können. Ein weiterer Faktor sind die Interaktionen selbst, welche in beiden Ländern komplex und vertrackt sind. Deutlich wird dies unter anderem am ambivalenten Verhältnis aller kollektiven Akteure zu der Frage, welche Rolle wissenschaftliches Wissen und Bürgerbeteiligung in einem Standortauswahlverfahren spielen und wie sich diese beiden zueinander verhalten sollten. Effekte können dann geschehen, wenn trotz differenten Ansichten zu diesen Themen ein Arbeitskompromiss gefunden wird.

Solche Ambivalenzen und Komplexitäten müssen aber nicht zwangsläufig zu einer Entscheidungsblockade und einer Verstärkung des Konflikts führen. Der bisherige Verlauf des Sachplanverfahrens in der Schweiz zeigt, dass es für ein funktionierendes Verfahren nicht in jedem Fall nötig ist, ein klares Verhältnis auf allen Ebenen zu schaffen. Voraussetzung ist, dass ein Arbeitskompromiss gefunden wird, dem alle beteiligten kollektiven Akteure zustimmen. Dieser muss als temporär gültig verstanden werden und die Ausgestaltung des Verfahrens in bestimmten Grenzen fle-

xibel bleiben, damit auf sich verändernde Kontextbedingungen reagiert werden kann.

In einem unflexiblen Verfahren können mikro-deliberative Ereignisse keine Effekte zeigen, da Effekte Handlungsfähigkeit voraussetzen. Ist das Verfahren starr, kann diesem nur noch gefolgt, es aber nicht mehr an neue Erkenntnisse oder Bedürfnisse angepasst werden. Die Notwendigkeit für eine solche Flexibilität wird zudem noch verstärkt durch die langen Zeiträume bis zum Verschluss eines Endlagers, da sich beispielsweise Definitionen von Sicherheit oder auch das Verständnis von gutem Regieren ändern können. Komplexitäten und Ambivalenzen sind Normalität in einer demokratischen Entscheidungsfindung. In welchem Maße sie die Endlagerpolitik blockieren können, hängt von deren Ausgestaltung ab.

Am deutschen Fall zeigt sich, dass Effekte häufig über lange Zeiträume hinweg entstehen. Sie sind eine Folge von Handlungen, welche oft durch Kontexte gebunden sind, die sich nur durch Lernprozesse ändern. Aushandlungs- und Entscheidungsprozesse in der Endlagerdebatte können als Langzeitprozesse verstanden werden, in denen kollektive Lernfortschritte möglich sind. Versteht man die Endlagerpolitik als einen solchen mehrstufigen Prozess, der Lernen zulässt und aus einer Aneinanderreihung von Arbeitskompromissen besteht, wird einerseits der Druck von jetzigen Verfahren genommen, sofort die „beste Entscheidung“ zu treffen. Andererseits verlangt es nach einem schrittweisen Verfahren, in dem die Entscheidungsfähigkeit über lange Zeiträume offen gehalten, also beispielsweise Kompetenzen aufrecht erhalten und ein Technologie=Lock-in verhindert werden. Nur so kann auch die oben geforderte Handlungsfähigkeit aufrecht erhalten werden. In der Kontrastierung der Endlagerpolitiken Deutschlands und der Schweiz wurde deutlich, wie wichtig institutionalisierte Schnittstellen für ein solches Verfahren sind. Das bedeutet, dass eine nur zeitweise Organisation mikro-deliberativer Ereignisse nicht hinreichend ist, wenn ein dialogorientiertes Verfahren angestrebt wird. Es werden Räume benötigt, in denen die verschiedenen Behörden, Industrie und die interessierte Öffentlichkeit aufeinandertreffen können, denn Kontakte zwischen ihnen entstehen nicht einfach spontan und werden auch nicht durch zeitlich begrenzt stattfindende mikro-deliberative Ereignisse geschaffen.

Effekte deliberativer Verfahren können zusammenfassend also insbesondere dann entstehen, wenn in einem schrittweisen, flexiblen Verfahren, welches institutionalisierte Räume für einen Austausch zwischen verschiedenen kollektiven Akteuren beinhaltet, Lernprozesse stattfinden und Kompetenzen aufrecht erhalten werden. Diese idealen Kontextbedingungen sind in keinem der beiden Länder vollständig gegeben. Die

Effekte, die sich in der deutschen und schweizerischen Endlagerpolitik durch mikro-deliberative Ereignisse zeigen, sind folglich stark abhängig vom Kontext, in dem die Ereignisse organisiert wurden. Zwar können sich Gesprächsbereitschaft und Offenheit gegenüber den jeweils anderen kollektiven Akteuren im Prozess verstärken. Wie in der Schweiz zu sehen ist, sind aber gewisse Grundlagen an Gesprächsbereitschaft, Willen zur Argumentation und Offenheit notwendig, damit etablierte und „weitere kollektive Akteure“ überhaupt miteinander ins Gespräch kommen und politische Entscheidungsträger Änderungen im Verfahren vornehmen. Ist ein solches Umfeld gegeben, ist es trotzdem nicht selbstverständlich, dass ein sich selbst verstärkender Prozess der Öffnung stattfindet. Dies ist der Fragilität des Arbeitskompromisses in einer solch konflikthafter Situation, wie sie im Fall der Endlagerung in beiden Ländern besteht, geschuldet. Ein konstant hohes Niveau an Aufmerksamkeit aller Beteiligten ist gefordert und es bleibt offen, wie dieses über lange Zeiträume erhalten werden kann. Das hohe Niveau an Aufmerksamkeit wird benötigt aufgrund der Vielzahl an Aspekten, die ein solcher Arbeitskompromiss berücksichtigen muss. Diese reichen von Debatten darüber, was Transparenz im Arbeitsalltag bedeuten sollte und was ein faires Verfahren ist, bis hin zu Debatten über Verantwortung für getroffene Entscheidungen. Eine über lange Zeiträume konstante aktive Teilhabe der Öffentlichkeit an politischen Prozessen ist somit eine Voraussetzung für ein Verfahren, welches Lernprozesse beinhalten soll.

Zusammenfassend lässt sich der politische Entscheidungsfindungsprozess als Aushandlungsprozess konzeptualisieren, welcher durch eine langfristige Folge von Arbeitskompromissen operationalisiert wird, die über die Frage der Organisation einzelner mikro-deliberativer Ereignisse hinausgehen. Solche Arbeitskompromisse setzen einen gesellschaftlichen Aushandlungsprozess über Fragen wie die Bedeutung von Fairness im Verfahren voraus. Diese Aushandlungsprozesse haben keinen jetzt schon absehbaren Ausgang.

Der Umgang mit Nicht-Wissen in Schweden

Das schwedische Vorgehen hinsichtlich nuklearer Endlagerung wird im internationalen Diskurs oft als Vorzeigemodell gehandelt. Begründet wird dies vor allem mit Bezugnahmen auf den weit fortgeschrittenen Prozess – 2011 wurde der offizielle Antrag zur Errichtung des Endlagers für abgebrannte Brennelemente eingereicht und befindet sich nun im Review. Die Inbetriebnahme erwartet das für den gesamten Prozess zuständige Unternehmen SKB Anfang der 2030er Jahre (vgl. SKB (2017)).

Auch die kontinuierliche Forschung an einem spezifischen Einlagerungskonzept, seit nunmehr 40 Jahren, wird hervorgehoben. Zudem werden die Geschwindigkeit und der Erfolg bei der Auswahl eines Standortes vorrangig den partizipativen Elementen des Prozesses zugeschrieben.

Doch auch der scheinbar reibungslose schwedische Prozess ist mit der Komplexität seines Gegenstandes konfrontiert: Der Zeithorizont von einer Million Jahre, in dem das Endlager sicher sein soll, erhöht die Schwierigkeit, Aussagewissen bereitzustellen (vgl. Janich u. a. (2012)) und nimmt somit Einfluss auf die Entscheidungsfindung. Gleichzeitig bleibt ein Dilemma bestehen: Die „Unentscheidbarkeit der Probleme wächst – gleichwohl müssen Entscheidungen getroffen werden“ (Böhle u. Weihrich, 2009, S. 10). G. Bechmann und N. Stehr folgend ist der „Umgang mit Nicht-Wissen [...] zur entscheidenden Variable bei Entscheidungen geworden. Da wir die Zukunft nicht kennen können, ist es umso wichtiger, wie dieses Nicht-Wissen in öffentlichen Entscheidungssystemen prozessiert wird“ (Bechmann u. Stehr, 2000, S. 120).

Das Bewusstwerden der Kontingenz wissenschaftlichen Wissens, besonders vor dem Hintergrund komplexer und weit in die Zukunft reichender Problemstellungen, schlägt sich in den letzten 30 Jahren in einer verstärkten Hinwendung der Soziologie zu Theorien des Nichtwissens nieder (vgl. Böschen u. Wehling (2012)). Das klassische Wissenschaftsverständnis, das Nichtwissen als „Noch-Nicht-Wissen“ begreift, welches sich durch ausreichende Forschung auflösen ließe, bricht auf. Die sozialen Konstruktions-, Definitions- und Anerkennungsprozesse von dem, was gar nicht oder nicht abschließend gewusst wird, sowie dessen politische Dimensionen geraten in den Blick (vgl. Böschen u. Wehling (2004)). Die Dissertation nimmt diese Überlegungen auf und überträgt sie auf die Endlagerforschung, für welche hier noch eine Leerstelle besteht. Von der Bedeutung des Nichtwissens für die hier stattfindenden Entscheidungsprozesse ausgehend, wird in der Arbeit herausgearbeitet, wie das Unterfangen Endlagerung in Schweden angegangen wird und wie dabei von den Akteuren Nichtwissen wahrgenommen, bewertet, bearbeitet und strategisch eingesetzt wird.

Anhand von 23 leitfadengestützten Interviews mit Vertretern der als relevant identifizierten Akteursgruppen sowie zusätzlicher Dokumente wird das Feld analysiert, in dem sich die Akteure, welche mit der Endlagerung befasst sind, bewegen. Das methodische Vorgehen der Analyse ist an die Grounded Theory (Corbin u. Strauss, 1990) angelehnt, nach welcher unter Rückgriff auf die Software MAXQDA codiert wird. Ergänzt werden die Interviews durch die qualitative Inhaltsanalyse weiterer Dokumente, wie zum Beispiel der Protokolle der von SKB zur Umweltverträglich-

keitsprüfung durchgeführten öffentlichen Anhörungen mit als potenziell betroffen erachteten Bürgern. Ebenso die Berichte des Swedish National Council for Nuclear Waste⁴⁰, welches 1992 von der schwedischen Regierung ins Leben gerufen wurde und mit der Untersuchung und Klärung von Fragen bezüglich radioaktiven Abfalls und dessen Entsorgung betraut ist.

Ein Ergebnis der Arbeit ist die Betrachtung der Nichtwissensphänomene anhand dreier hierfür entwickelte Analysekategorien: Erstens das Aufscheinen von Nichtwissen als Gegenstand und Problem, zweitens die Bewertung des Nichtwissens bezüglich des Wissens der Akteure über Nichtwissen, in Hinblick auf die Intentionalität des Nichtwissens, sowie seiner zeitlichen Stabilität (vgl. die Dimensionen des Nichtwissens bei (Wehling, 2006, S. 116ff)). Die dritte Analysekategorie ist die der Bearbeitung, die den (strategischen) Umgang mit Nichtwissen umfasst. Der Versuch, spezifiziertes Nichtwissen durch Forschung, aufzulösen, gehört ebenso dazu wie der Verweis, dass schon „Genug-Wissen“ bestehe und das Nichtwissen somit für weiteres Handeln irrelevant sei.

Das Aufscheinen von Nichtwissen ist zentral mit dem Entsorgungskonzept des Unternehmens SKB verbunden, das den Namen KBS⁴¹ trägt. Es wurde in seiner Ursprungsform 1977 von SKB aufgelegt, nachdem eine absolut sichere Entsorgung zur rechtlichen Vorbedingung für weitere Reaktoren wurde. Das Konzept KBS ist die Konstante des Prozesses, nahezu die gesamte Entsorgungsforschung basiert darauf. Zudem ist es in seiner Darstellung im Safety Case⁴² ein Rechtsgegenstand, über den Umweltgericht, Regierung und Prüfbehörden verhandeln. KBS ist zentral, weil SKB mit diesem Konzept einen Bereich des handlungsrelevanten Nichtwissens definiert hat, den es im Anschluss zu bearbeiten gilt. Das Problem der Entsorgung nuklearer Abfälle scheint handhabbarer, wenn nur ein Lösungsweg betrachtet wird und andere Alternativen qua behaupteter Irrelevanz nicht betrachtet werden und im Raum des Nichtwissens verbleiben. Diese Engführung eines bis 1977 eher abstrakten Problems auf eine sich in den letzten Jahren immer stärker materialisierte und institutionalisierte Lösung wird von den Kritikern besonders dahingehend bemängelt, dass Alternativen nicht spezifiziert werden und damit anderes Nichtwissen absolut bleiben muss.

Auch wenn die Vorstellung davon, Nichtwissen sei prinzipiell durch einen entsprechenden Aufwand auflösbar, dominant ist, so thematisieren doch einige interviewte Akteure Nichtwissen auch als ein nicht-epistemi-

⁴⁰Der schwedische Name für dieses Council ist „Kärnavfallsrådet“.

⁴¹KBS ist die Abkürzung für „kärnbränslesäkerhet“, dt.: Kernbrennstoffsicherheit.

⁴²In der deutschen Entsorgungsdiskussion begrifflich als „Langzeitsicherheitsnachweis“ gefasst.

sches, irreduzibles Nichtwissen. Dies geschieht häufig dann, wenn über die Komplexität des Gegenstands Endlagerung reflektiert und besonders der Zeithorizont, in welchem KBS sicher sein soll, thematisiert wird. Wird in Bezug zu Noch-Nicht-Wissen meistens eine gewisse Bearbeitungsge-wissheit deutlich, ändert sich dies bei der Thematisierung des Zeithorizonts von 100.000 bis einer Million Jahre, in welchem das Endlager sicher sein soll. Oftmals wird in diesem Zusammenhang die Schwierigkeit von Prognosen für solch lange Zeiträume thematisiert. Es wird jedoch auch Unsicherheit hinsichtlich möglicher Alternativen zu diesem schwierigen Unterfangen und zu prognostischen Überlegungen artikuliert. Dies ist exemplarisch für die Auseinandersetzung der interviewten Personen mit dem Gegenstand des irreduziblen Nichtwissens. Die Vorstellung, dass bestehendes Nichtwissen mit Hilfe von ausreichend Zeit und Ressourcen in Wissen transformiert werden könne, ist jedoch bestimmend. Die Akteure gehen von der prinzipiellen Wissbarkeit aus und versuchen trotz zeitweisen Aufscheins von irreduziblem Nichtwissen, dieses möglichst wieder in Begriffe des Risikos einzuhegen. Generell überwiegt ein Pragmatismus, der die prinzipielle Umwandelbarkeit von Noch-Nicht-Wissen in Wissen proklamiert.

In vielen Fällen bemühen sich die Akteure darum, die Unterscheidung zwischen sozialen und technischen Aspekten der Endlagerproblematik zu mobilisieren. Diese Grenzziehung kann als Bearbeitung von Nichtwissenskonflikten verstanden werden und wird häufig dann vorgenommen, wenn es darum geht, Zuständigkeiten und die Legitimität bestimmter Positionen zu markieren. Auch die Relevanz oder Irrelevanz bestimmter Fragen kann an diese von den Akteuren vorgenommene Unterscheidung gekoppelt sein. Akteure außerhalb von SKB werden durch SKB beispielsweise oftmals als bestenfalls ‚kompetente Fragensteller‘ imaginiert, deren Input immer in Abhängigkeit zu dem von SKB bereitgestellten Wissen zu sehen ist. Der ‚kompetente Fragensteller‘ kann zwar Lücken in ihrer Forschung aufweisen, die Produktion von eigenständigem Wissen scheint SKB aber nicht vorstellbar. Dies verweist auf eine mögliche Schließung in Bezug auf die Einflussmöglichkeiten durch Akteure, die sich nicht beruflich mit Themen der Endlagerung beschäftigen.

Ein wichtiger Aspekt der schwedischen Bearbeitung der Endlagerproblematik ist außerdem die Untergliederung in verschiedene Prozessphasen, welche auch rechtlich festgeschrieben sind. Eine derartige Untergliederung wird nun auch in Deutschland angestrebt, wurde von der Endlagerkommission in ihrem Abschlussbericht empfohlen und hat seinen Niederschlag im Standortauswahlgesetz 2017 gefunden. Die Zergliederung des immensen Zeitraums von einer Million Jahre hilft dabei, das Problem be-

arbeitbarer erscheinen zu lassen. Dies beinhaltet auch ein Moment der Verharmlosung des Endlagerproblems, da irreduzibles Nichtwissen damit weiter aus dem Bewusstsein verdrängt wird und die Bearbeitungsgewissheit für kürzere Zeiträume größer scheint.

Entsorgungsoptionen aus Sicht kommunaler und lokaler Akteure

Nach Auffassung mehrerer Kommunalpolitikerinnen und -politiker sowie BI-Vertreterinnen und -vertreter aus fast allen Regionen hätte das vom Standortauswahlgesetz gesetzlich geregelte Standortauswahlverfahren erst beginnen sollen, wenn mit der Entsorgung verbundene grundsätzliche Konflikte und offene Fragen im gesellschaftlichen Dialog geklärt und bestenfalls befriedet worden wären (vgl. (Drögemüller, 2016, S. 199f)). Vielfach waren die Befragten der Meinung, dass ein breiter Dialog bzw. Diskussionsprozess hilfreich wäre, um „die“ Gesellschaft auf den bevorstehenden Suchprozess vorzubereiten und einhergehend das oft als unzureichend wahrgenommene Wissen und Problembewusstsein weiter Teile der Gesellschaft durch Wissensvermittlung und Kompetenzaufbau zu befördern (siehe ausführlicher auch Kapitel 3.7).

Zur regionalen Beteiligung Betroffener (Bevölkerung, Kommunalpolitik, NGO) wurden insgesamt hohe Ansprüche formuliert. Vor allem mit Blick auf antizipierte Verfahrensgerechtigkeit wurden dabei verschiedene Aspekte für sinnvoll erachtet, die einen Dialog oder eine Kooperation auf Augenhöhe (vgl. (Drögemüller u. Kuppler, 2017b, S. 123)) zwischen Behörden und Betroffenen auf unterschiedlichen Ebenen forcieren bzw. bestehenden Machtasymmetrien entgegenwirken. Über alle Interviews hinweg wurde es bspw. als äußerst wichtig erachtet, die potentiell Betroffenen frühzeitig und problemorientiert vor Ort zu informieren und einzubeziehen. Viele Befragte waren aufgrund ihrer Erfahrung der Ansicht, dass sich die Beteiligung dabei jedoch nicht in Informations- und Konsultationsmodi erschöpfen, sondern den regional Betroffenen effektive Formen der Mitsprache ermöglichen sollte, die über bisherige Beteiligungsmöglichkeiten hinausgehen.

Die Effektivität von Bürgerbeteiligung bemisst sich für viele Personen zudem daran, inwiefern sich die mittels Beteiligungsverfahren erarbeiteten Ergebnisse für den weiteren Prozess als relevant erweisen bzw. für die zuständigen Behörden eine bindende Wirkung entfalten. Nachvollziehbare Entscheidungswege und Informationen sowie eine wertschätzende Kommunikation gelten neben transparenten, d. h. eindeutig definierten Verfahrensstrukturen und Rollenzuschreibungen ebenfalls als wichtige Elemente eines als fair bzw. legitim beurteilten Beteiligungsverfahrens.

Das häufig artikuliert Bedürfnis nach Wertschätzung der Beteiligten und einem respektvollen Umgang hängt besonders mit der vielfach geschilderten Erfahrung zusammen, in früheren Beteiligungsverfahren bzw. Informationsveranstaltungen nicht ernst genommen worden zu sein (vgl. (Drögemüller u. Kuppler, 2017b, S. 201)).

Nahezu übereinstimmend werden auch Ausgleichs- und Fördermaßnahmen für betroffene Standorte als angemessen erachtet, um bspw. materielle oder immaterielle Schäden (z. B. sinkende Immobilienpreise, Stigmatisierung) zu kompensieren. Allerdings gelten Kompensationen als illegitim oder anrühig („Schmiergeld“), wenn diese an Bedingungen geknüpft werden, auf die Akzeptanz der kommunalen Gebietskörperschaften abzielen oder lediglich für lokale Prestige-Projekte verwendet werden (z. B. Bau von Schwimmbädern).

Mit Blick auf die Standortentscheidung fordern einige befragte BI-Vertreterinnen und -vertreter die zukünftig betroffenen Kommunen mit Vetorechten auszustatten, um diese u. a. dazu in die Lage zu versetzen, sich gegen Mehrheitsbeschlüsse wehren zu können. Andere Kommunalpolitikerinnen und -politiker sowie BI-Vertreterinnen und -vertreter lehnen die Implementation von Vetorechten jedoch mit dem Verweis auf die Entscheidungsbefugnis demokratisch legitimierter Gremien bzw. der drohenden Dominanz partikularer Interessen ab. Diese Befragten hielten eine Standortentscheidung durch den Bundestag durchaus für legitim, sofern die Betroffenen im vorherigen Standortauswahlverfahren in der Tat von „echten“ Mitwirkungs-, Mitentscheidungs- und Klagerechten Gebrauch machen können (Drögemüller, 2016, S. 207).

Zusammenfassend unterstreichen die empirischen Ergebnisse den Bedarf einer verlässlichen und gleichermaßen robusten Endlager-Governance. Demgegenüber werden gesellschaftliche Widerstände durch einen Mangel an Partizipation geradezu unterstützt und darauf aufbauend Paralyse der Problembearbeitung befördert. Die meisten Befragten erwarten neue Formen des Regierens, die eine breite und qualitativ hochwertige Bürgerbeteiligung mit fairen Verhandlungsprozessen zwischen Entscheidungsträgerinnen und -trägern und Betroffenen forcieren und spezifischen Informations- und Beteiligungsbedürfnissen unterschiedlicher Akteure gerecht werden und insbesondere den lokal Betroffenen verbindliche und effektive Formen der Einflussnahme bieten, die über bisherige Formen institutionalisierter Beteiligungsformen (z. B. Anhörung, Erörterung) hinausgehen.

Die Ergebnisse deuten ferner darauf hin, dass neutrale Prozessbegleiterinnen und -begleiter (z. B. Mediatorinnen und Mediatoren) eine Konfrontation von Vorhabenträger und Betroffenen vor Ort hemmen, Konflik-

te aufnehmen und faire Aushandlungsprozesse zusätzlich befördern können. Dies gilt gleichermaßen für (verfahrens-)externe Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Da die Beurteilung der gegenwärtigen Politik oft von hohem Misstrauen geprägt ist, das in alten Konflikten und Wertverletzungen wurzelt, erscheint eine historische Aufarbeitung des Entsorgungskonflikts erforderlich (Drögemüller, 2018).

Betroffenheit(en) im Umfeld kerntechnischer Anlagen

Mit den sozialen Auswirkungen kerntechnischer Anlagen befasst sich das Dissertationsprojekt „Betroffenheit(en) im Umfeld kerntechnischer Anlagen“ von Daniel Häfner. Untersucht werden primär die Auswirkungen und Abhängigkeiten am Beispiel des hessischen Standortes Hanau (Stadtteil Wolfgang), an dem sich seit 1957 bedeutsame kerntechnische Anlagen befanden. Sie wurden im Jahr 1995 geschlossen. Die Entwicklung des Standortes Hanau mit den dort ansässigen Firmen Nukem, Alkem etc. ist in besonderer Weise mit den politischen Entscheidungen zur Nutzung der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland verwoben. Die Dissertation befindet sich noch in Bearbeitung und wird bis Ende 2018 abgeschlossen. Die folgenden Passagen benennen erste robuste Zwischenergebnisse.

Im Gegensatz zu verschiedenen anderen – auch gefährlichen respektive riskanten – Großprojekten sind kerntechnische Anlagen in die Mehrebenenpolitik eingebunden (Multi-Level-Governance). Die Kerntechnik war in ihrer Entwicklung zunächst insbesondere auf die supranationalen und internationalen politischen Rahmenbedingungen angewiesen, auf deren Grundlage Nationalstaaten die Entwicklung der Kerntechnik forcieren konnten. Am Standort Hanau lässt sich dies beispielhaft zeigen. Landesregierungen konnten solche Planungen und Prozesse in der Regel lediglich beschleunigen oder abbremsen. Die Gesamtheit der politischen Entscheidungen und Rahmenbedingungen manifestiert sich dann aber an den jeweils konkreten Standorten. Das Ende des Standortes Hanau mit seiner zentralen Bedeutung für die deutsche Atomwirtschaft ist nicht nur aus dem Transnuklearskandal und dem folgenden ökonomischen Niedergang zu (Radkau u. Hahn, 2013, S. 343), sondern ist ebenso auf eine Änderung der Strategie der Bundesregierung, also auf die nationalstaatlicher Ebene zurückzuführen⁴³. Wie bei der Realisierung anderer großtechnischer Projekte auch, findet in Bezug auf die Planung kerntechnischer Anlagen zunächst eine Irritation in der Lebenswelt statt, zu der insbesondere (potenziell) betroffene Personen gehören. Diese Irritation

⁴³Die Untersuchungen dazu werden aktuell noch detaillierter ausgearbeitet.

könnte sich auflösen oder verfestigen (bspw. durch unterschiedliche Risikowahrnehmungen). Geografische oder soziale Betroffenheit(en) werden somit wesentlich durch die einzelnen Akteure und Individuen selbst „konstruiert“. Dies ist sowohl in politischen und ökonomischen wie auch in lebensweltlichen Dimensionen zu beobachten (Brand u. Honolka, 1987, S. 10ff). Eine Spezifik kerntechnischer Anlagen ist in der unterschiedlichen Risikowahrnehmung ionisierender Strahlung durch unterschiedliche Akteure (und dadurch der Entstehung von Betroffenheit) zu sehen, die unter anderem auf verschiedene Annahmen von Experten (Experten-dissens) zur Auswirkung von Niedrigdosisstrahlung zurückgeht und bis heute wissenschaftlich nicht abschließend entschieden werden kann.

In Bezug auf kerntechnische Anlagen zeichnen sich in der Folge Argumentationsmuster der Teilnehmer des Diskurses ab, die sich zunehmend um verschiedene Kernüberzeugungen gruppieren. Solche konkurrierenden Positionierungen, die zur unterschiedlichen Konstruktion von Betroffenheit(en) führen, ähneln in der Entstehung empirischen induktiven Mikro-Theorien strukturell. Wird der (zu unterlegenden) Hypothese gefolgt, dass Betroffenheit(en) im Wesentlichen zunächst auf „ad-hoc-Mikro-Theorien“ basieren, so können sie mit Hilfe der Wissenschaftstheorie untersucht werden⁴⁴. Darauf aufbauend wird untersucht, ob und wie die Konstruktionen von Betroffenheit(en) im Umfeld kerntechnischer Anlagen als Entstehung empirisch induktiver ad-hoc-Hypothesen interpretiert werden können und in Bezug auf die langfristige Handlungsorientierung Betroffener ähnlichen Verifikations- und Falsifikationsbedingungen unterliegen.

5.2.5 Transversalprojekt 2 als interdisziplinäre Kooperation

„Technikfolgenabschätzung und Governance“ lautet der Titel des Transversalprojektes 2, das vom ITAS geleitet wurde. Dafür hat ITAS mit ENTRIA-Partnern ausgewählte Aspekte vertieft bearbeitet⁴⁵. Zentrale Ergebnisse der interdisziplinären Kooperationen werden hier zusammengefasst. Ein Teil der Ergebnisse ist bereits publiziert, weitere sind für Veröffentlichungen vorgesehen.

⁴⁴Hier wird insbesondere auf die Theorie des „Raffinierten Falsifikationismus“ von (Lakatos, 1982) abgestellt.

⁴⁵Diese Kooperation sollte nach der ursprünglichen Planung mit dem IRS der Leibniz-Universität Hannover und mit dem FFU der FU Berlin verwirklicht werden. Unmittelbar nach Projektstart zeigte sich, dass die anstehenden Aufgaben in erweiterten Teams bearbeitet werden müssen. Von besonderer Bedeutung waren dabei neben dem ITAS das IRW der TU Braunschweig, das IW der Leibniz Universität Hannover, risicare, das IELF der TU Clausthal und das INE des KIT.

Zur Erläuterung des ENTRIA-Ansatzes: „Interdisziplinäre Aktivitäten“ wurden ausgehend vom Memorandum auf verschiedenen Projektebenen und in einer Reihe von abgestimmten Einzelkooperationen entwickelt. Aus Governance-Perspektive sind viele Teile der sozio-technischen Entsorgungsdiskussion noch nicht systematisch abgearbeitet (vgl. Brunnengräber u. a. (2014b)). Das Thema „Grenzwerte“ wurde beispielsweise bisher fast ausschließlich aus technischer Perspektive bearbeitet. Ähnliches gilt für die Themen „Safety Case“ und „Technisches Monitoring“. Entsprechend ging es darum, sichtbar zu machen, welchen Beitrag sozial- und rechtswissenschaftliche Perspektiven zu den eher technisch ausgerichteten Themenstellungen leisten können und führte beim Thema Monitoring beispielsweise zu einem neuen ENTRIA-Konzept der Long-term Governance, für die vor allem ITAS verantwortlich ist (Kuppler u. Hocke, 2018). Interdisziplinäres Arbeiten mündete ausgehend von vorangegangenen Kooperationen in Bearbeiter- und Jahrestreffen oder von gemeinsamen Vorträgen auf Konferenzen häufig in eine intensivere Auseinandersetzung mit einzelnen Themen. Konkrete Resultate solchen interdisziplinären Arbeitens sind der Sammelband zu „Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe“ (Smeddinck u. a., 2016) u. a. mit den Beiträgen (Grunwald, 2016b; Röhlrig u. Hocke, 2016), die Zeitschriftenbeiträge (Brunnengräber u. Hocke, 2014; Hocke u. Smeddinck, 2017) und der ENTRIA-Arbeitsbericht 06 zum Thema „Bergwerk als technologisches Artefakt“ (Mbah, 2016)⁴⁶.

Interdisziplinäre Verständigung und Zusammenarbeit wurde in ENTRIA durch speziell entwickelte Arbeitstreffen mit Mitarbeitern aus dem ENTRIA-Team unterschiedlichster Disziplinen gestärkt; Beispiele dafür sind die Themen „Grenzwerte und Strahlenschutz“, „Long-term Governance und technisches Monitoring“ sowie „Wissensmanagement und Wissenspolitik“. Ergebnisse dieser Arbeitstreffen wurden in Form von Protokollen und Thesenpapieren festgehalten und flossen so in Zeitschriften-Artikel ein. Ein Beispiel dafür ist das ITAS-ENTRIA-Arbeitsbericht „Grenzwerte beim Umgang mit radioaktiven Reststoffen (Brunnengräber u. a., 2015b) und der darauf aufbauende Aufsatz von Kalmbach u. Röhlrig (2016). Das Thema „Wissensmanagement und Wissenskommuni-

⁴⁶Letztgenannte Publikation ist eine TA-Mikrostudie (ITAS-F) zu Entsorgungsbergwerken als Infrastruktureinrichtung und Artefakt, die unter Beratung und Review durch die TU Clausthal angefertigt wurde. Hierbei wurden aus TA-Perspektive zentrale naturwissenschaftlich-technische Forschungslücken benannt und nichtintendierte Folgen eines Entsorgungsbergwerks herausgearbeitet.

kation“ wird in einer Interdisziplinaritätsbroschüre (Kuppler u. a., 2018) diskutiert⁴⁷.

Auf die konkrete Entwicklung eines neuen Standortauswahlverfahrens ab 2013 durch den Gesetzgeber und die neue Verhandlungsbereitschaft zweier Bundesländer (Baden-Württemberg und Schleswig-Holstein), wurden ebenso reagiert wie auf die innerwissenschaftlichen Herausforderungen, neben disziplinärer und punktueller interdisziplinärer Forschung auch neuere Ansätze der transdisziplinären Forschung aufzugreifen⁴⁸.

Grenzwerte und Governance in der interdisziplinären Zusammenarbeit

Die Erkenntnisse aus der Governance-Forschung wurden interdisziplinär anhand des Themas Grenzwerte im Transversalprojekt „Technikfolgenabschätzung und Governance“ mit Ergebnissen anderer Disziplinen in Verbindung gesetzt und weiterentwickelt, s. auch Kap. 3.5. Die aus dieser Debatte für die Governance-Diskussion wichtigen Aspekte werden im Folgenden dargestellt.

Durch Grenzwerte werden Belastungsgrenzen festgesetzt. Grundsätzlich gilt das Ziel, dass bei Einhaltung der festgelegten Grenzwerte die negativen Auswirkungen auf ein ungefährliches bzw. gesellschaftlich toleriertes Maß reduziert werden. Grenzwerte sind aber keine unveränderlichen Größen. Sie werden in gewissen Abständen neu verhandelt – meist dann, wenn neue wissenschaftliche Erkenntnisse vorliegen, politische Gremien entsprechende Beschlüsse fassen oder Belastungen gesellschaftlich nicht mehr toleriert werden und verantwortliche Gremien darauf reagieren. Unterschiedliche Grenzwerte der Strahlenbelastung für Nahrungsmittel je nach Herkunftsregion oder das Senken oder Anheben von Grenzwerten werden in spätmodernen Gesellschaften, die durch ein hohes Bildungsniveau und damit einhergehend informierte und selbstbewusste Bürgerschaften gekennzeichnet sind, immer wieder in Frage gestellt und die wissenschaftliche Deutungshoheit, aber auch das politische Handeln bleiben nicht unangefochten. (Brunnengräber u. a., 2016) unterscheiden grundlegend (1) Wahrnehmungen zu den Effekten ionisierender Strahlung, (2) Wahrnehmung von Grenzwerten und (3) Aspekte, die die Entstehung von Grenzwerten bestimmen. Weiterhin werden Thesen zur Problematisierung der Grenzwerte zur Diskussion gestellt. Vertieft eingebettet werden die Thesen durch deren Kontextualisierung

⁴⁷In diesem Zusammenhang steht auch ein Ausbildungsmodul zu „Technikfolgenabschätzung und Governance“, das von ITAS entwickelt und experimentell eingesetzt wurde. Darüber hinaus beteiligte sich ITAS viermal mit dem Thema Governance an der Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ in Hannover (ITAS-G).

⁴⁸Zur transdisziplinären Forschung siehe Krohn u. a. (2017) und Pohl u. a. (2017).

anhand von Beispielen aus der internationalen Fachdiskussion und der Anwendung im deutschen Kontext durch (Kalmbach u. Röhlig, 2016) (s. auch Kap. 3.5.1 und 3.5.2) .

Die Auswahl der hier vorgestellten Thesen erfolgt anhand ihrer direkten Relevanz für die Governance-Debatte. Bezüglich der Wahrnehmung zu den Effekten ionisierender Strahlung ist von Relevanz, dass der lange vermittelte Eindruck „absoluter Sicherheit“ und „völlig unschädlicher Emissionen“ durch Betreiber kerntechnischer Anlagen oder Kernanlagen und durch Befürworter der Kernenergie zu einem Vertrauensverlust in Regelungssysteme zur Minimierung der Freisetzung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung geführt hat. Die Regelungssysteme und die diese Systeme überwachenden Akteure werden daher heute von großen Teilen der Öffentlichkeit äußerst kritisch betrachtet. Dies hat seine Gründe in vorausgehenden Erfahrungen.

Kurzfristige oder geringe Grenzwertüberschreitungen werden in Wissenschaft, Wirtschaft und Politik oft trivialisiert und als Kommunikationsproblem dargestellt. Maßnahmenpakete wie „educating the public about risk“ und „public understanding of science“ werden oft als Strategien zur Auflösung dieser Problematik verstanden. Vor diesem Hintergrund ist darüber zu reflektieren, wie es zu Grenzwerten kommt und welche Governance-relevanten Problemlagen aus Sicht des Autorenteam zu erkennen sind (Brunnengräber u. a., 2016). Festgehalten wurde entsprechend:

- Grenzwerte werden erst durch den Einsatz bestimmter Technologien und der Ermittlung ihrer unerwünschten Nebenfolgen bedeutsam. So wird Radioaktivität als zentrales gesellschaftliches Problem wahrgenommen, weil der Mensch sich ionisierende Strahlung und radioaktive Stoffe in großem Stil nutzbar macht.
- Trotz der Festlegung von Grenzwerten lässt sich das mit einer Handlung oder Exposition verbundene Risiko zwar quantifizieren, aber nicht eindeutig bestimmen. Darüber hinaus sind die Überlegungen, die zur Festlegung von Grenzwerten führen, selbst auch mit Ungewissheiten („uncertainties“) verbunden. Die Größe und die Gewichtung dieser Ungewissheiten werden von verschiedenen Akteuren unterschiedlich eingeschätzt.
- Grenzwerte sind also nicht aus konsensuellen Wissensbeständen „ableitbar“ (Brunnengräber u. a., 2016, S. 6). Vielmehr gehen in sie auch Interessenlagen und unterschiedliche Wahrnehmungen und Einschätzungen ein (s. Kap. 3.5.2). Insbesondere vorhandene Un-

gewissheiten und nicht von allen Teilen der Öffentlichkeit geteilte Einschätzungen sind dabei immer wieder ausschlaggebend⁴⁹.

Die Entscheidenden aber übernehmen angesichts ihrer Festlegungen, die unter spezifischen Ungewissheiten und Unsicherheiten getroffen wurden, faktisch auch die Verantwortung für die Folgen und unvorhergesehenen Nebenfolgen der regulatorischen Verfahren und konkreten Maßnahmen (Brunnengräber u. a., 2016, S. 7). Regulierungssysteme mit Grenzwerten für ionisierende Strahlung und Freisetzung radioaktiver Stoffe werden sowohl hinsichtlich technisch-naturwissenschaftlicher Elemente (Debatte über Richtigkeit der ICRP-Modelle) als auch hinsichtlich politischer Elemente (Debatte über das IAEA-WHO-Agreement) in Frage gestellt. Mit erweiterter Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Festlegung von Grenzwerten⁵⁰ kann bei der Errichtung von kerntechnischen Anlagen bzw. Kernanlagen und im speziellen Fall beim Bau eines Endlagers eine Konfliktentlastung erreicht werden. Insgesamt zeigt das Papier, dass mehrere Forschungsfragen aus diesem Bereich detailliert aufzuarbeiten wären.

Technisches Monitoring und Long-term Governance

Nachdem das Konzept der „Rückholbarkeit“ während der Projektlaufzeit von ENTRIA durch die Endlagerkommission und das Standortauswahlgesetz zu einer prominent bewerteten Entsorgungsoption wurde, zeigten sich auch für Fragen der Technikfolgenabschätzung und der Governance neue Herausforderungen. Ausgehend von dem Paradigma der Technikfolgenabschätzung, „problemorientiert“ vorzugehen, entstand in der Mitte der Projektlaufzeit disziplinenübergreifende Vernetzung⁵¹. Dieses Netzwerk stellte sich der Frage, welche Voraussetzungen geschaffen werden müssen, um eine Rückholbarkeitsentscheidung technisch und gesellschaftlich vorzubereiten und koordiniert mit Politik und Zivilgesellschaft professionell umzusetzen⁵².

Solides Wissen über erwartbare Entwicklungen im Tiefenlager und tolerierbare Abweichungen davon in Kombination mit einem wissenschaftsbasierten Monitoring des technischen „Endlagersystems“ wird eine Entscheidungsgrundlage sein. Die Governance-Forschung legt dazu gleich-

⁴⁹Zu den Ungewissheiten und spezifischem Nichtwissen siehe Böschen u. Wehling (2012) und Wulf (2015).

⁵⁰Siehe inhaltlich dazu Smeddinck (2016).

⁵¹Kernteam IRW Braunschweig, IW der LUH, INE am KIT, risicare, und ITAS am KIT sowie als assoziierter Partner IGB-TUBS.

⁵²In diesem Abschnitt werden die Erkenntnisse vorgestellt, welche sich aus dieser interdisziplinären Kooperation spezifisch für Transversalprojekt 2 und darin insbesondere die Governance-Debatte ergaben.

zeitig noch eine weitere Fragestellung nahe. Diese beschäftigt sich in besonderer Weise mit der Sicherstellung von Handlungsfähigkeit über ungewöhnliche Zeiträume hinweg und dafür angepasste verschiedene Formen der Kooperation zentraler Akteure der nuklearen Entsorgung. Zu diesen Akteuren gehören im Regelfall Wissenschaft, Entsorgungswirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft. Das Zusammenspiel dieser Akteure kann nur durch institutionalisierte Modi der Koordination sichergestellt werden. Mittelfristig bedeutet dies das Schaffen spezieller Einrichtungen, welche die koordinierten Prozesse gestalten. Die Aufgabe dieser Einrichtungen besteht nicht nur darin, formal Verantwortung zu übernehmen, sondern durch die Implementierung von Governancestrukturen fähig zu sein, in schwierigen Entscheidungssituationen, die durch unsicheres Wissen und eine Vielzahl von beteiligten Akteuren geprägt sind, professionell zu handeln.

Als Ausgangspunkt, mit dem sich das interdisziplinäre Vorhaben auseinandersetzte, wurde folgendes Problem identifiziert und als zentrale Fragestellung herausgearbeitet. In welche Richtung technisches Monitoring entwickelt werden soll, hängt auch mit der Zielstellung der Monitoring-Aktivitäten zusammen. Die Forschung und Entwicklung in diesem Feld bedarf gesellschaftlicher Debatte darüber, was gewünscht ist. Neben dem technischen Monitoring, das über Jahrzehnte bis zu mehreren Jahrhunderten zuverlässige Messdaten liefern soll, bedarf es gesellschaftlicher Institutionen, die diese (mindestens vorläufige) Zielsetzungen ernst nehmen, die entstehenden Monitoring-Daten interpretieren und auf einer geregelten Grundlage eine Entscheidung treffen können. Diese Entscheidung kann zum Beispiel sein, dass Abfälle zurückgeholt werden müssen. Allerdings ist auch zu beachten, dass trotz irritierender Messdaten die Entscheidung lauten kann, jetzt wird nicht rückgeholt. Welches „institutionelle Setting“ dafür notwendig sein könnte, welche technischen Möglichkeiten und Grenzen des Monitorings bestehen und welche Überlegungen und Entwicklungen dabei heute bereits erfolgen sollten, wurde ihm Rahmen eines Workshops beraten⁵³. Es ist also zu reflektieren, welcher Typ von Institution entwickelt werden sollte. Für den sozialen Kontext der Institution, ihrer institutionellen Partner und der Entscheidungsprozesse zur Rückholbarkeit wurde an dieser Stelle der Begriff „Long-term Governance“ eingeführt. Eine Buchpublikation befindet sich in Vorbereitung (Hocke u. a., 2018).

Um einen fachlichen Ausgangspunkt zu haben, wurde das Long-term-Stewardship-Konzept gewählt, wie es vom Department of Energy der

⁵³Zu den Vorträgen des Workshops finden sich Informationen unter https://www.itas.kit.edu/downloads/veranstaltung_2016_entria_temo_info.pdf.

USA (Abk. DOE) entwickelt wurde. In diesem wird klar herausgestellt, dass es besondere institutionelle Anstrengungen braucht, um einerseits mit den relevanten Anlagenteilen eines Tiefenlagers im Alltagsbetrieb angemessen umgehen zu können und bei nicht-gewünschten Ereignissen schnell handeln zu können (siehe auch Kapitel 3.7 und (Kuppler u. Hocke, 2015, S. 8–10)). Wie das wissenschaftlich-technische Monitoring im Hinblick auf ungünstige Ereignisse eingebunden werden sollte, war eine Frage, mit der sich der Workshop vertieft auseinandersetzte. In seiner Keynote betonte Metlay⁵⁴, dass die Art und Weise, wie Institutionen nicht nur konzeptionell gestaltet sind, nicht die alleinige Frage sein darf. Vielmehr ist auch zu beachten, wie sie über Zeit diese Aufgabe wahrnehmen. In den USA sei die Anwendung des Stewardship-Konzeptes nicht sehr erfolgreich gewesen, da die federführenden Akteure zwar dem Konzept zustimmten und es verabschiedeten. Bei der Umsetzung des Stewardship-Konzepts für nukleare Entsorgungslagen wäre aber von einem Automatismus ausgegangen worden, der nicht eingetreten sei⁵⁵. Kontinuierliche „Unterstützung“ und „zielgerichtetes Organisieren“ wären nicht ausreichend erfolgt, so dass der konkrete Plan nicht in die Praxis umgesetzt und antreibende institutionelle Einheiten nicht entstanden wären. Nach dieser politisch-pragmatisch ausgerichteten Analyse skizzierte Anne Bergmans⁵⁶ den aktuellen Wissensstand aus Sicht der Science and Technology Studies und der sozialwissenschaftlichen Wissenschaftsforschung. Dieser weise insbesondere auf die notwendige proaktive Gestaltung von Schnittstellen und Dialogforen hin. An diesen Schnittstellen müsse – so das funktionalistische Kernargument – einerseits die technische Machbarkeit möglicher Maßnahmen geprüft werden. Andererseits sei sicherzustellen, dass die formulierten sozio-politischen Erwartungen verschiedenster Akteure an die Gestaltung der eingesetzten Technologie auch substantiell aufgegriffen werden.

Interdisziplinäre Forschung berücksichtigt immer disziplinäre und auch technisch-naturwissenschaftliche Ergebnisse. Der Inhalt der naturwissenschaftlichen Vorträge wurde bereits auf Seite 157 referiert. Smed-

⁵⁴Metlay, D. (2016): Organizations Matter. Monitoring and Long-term-Governance, Workshop Technical Monitoring and Long-term Governance, Karlsruhe 18. - 19.10.2016

⁵⁵Die Entscheidungsprozesse wären als „black box“ behandelt worden, so Metlay.

⁵⁶Bergmans, A. (2016): Insights from science and technology studies (STS) and social studies of science (SSS) on the long-term governance of nuclear waste: What challenges lie ahead for policy and research. Workshop Technical Monitoring and Long-term Governance, Karlsruhe 18. - 19.10.2016

dinck und Semper⁵⁷ wiesen aus Perspektive interdisziplinär angelegter Rechtswissenschaft darauf hin, dass über längere und lange Zeiträume Formen von Institutionen ökonomisch robust und gemeinwohl-orientiert arbeiten könnten. Stiftungen mit eigenen Formen der Absicherung wären sowohl in Niedersachsen wie auch an anderen Beispielen (z. B. in der Kranken- und Altenpflege) beachtenswerte Beispiele. Die Buchveröffentlichung wird die verschiedenen hier dargestellten Facetten um weitere Bereiche (wie Erwartungen der Endlagerkommission ans Monitoring, aber auch Aspekten von Ungewissheit und Nicht-Wissen) ergänzen.

Zusammenfassend können aufgrund der vorliegenden interdisziplinären Arbeiten zu Long-term Governance und technischem Monitoring fünf Punkte festgehalten werden:

- Obwohl heute noch keine Praxiserfahrungen mit dem Monitoring von nuklearen Abfällen vorliegen, sind, erwartbare Probleme auf Grund institutioneller Herausforderungen und gesellschaftlicher Erwartungen heute vorzudenken. Dazu gehört auch, aus Erfahrungen mit dem DOE-Konzept zu Long-term Stewardship Schlüsse zu ziehen.
- Wenn sich heute Probleme, wie z. B. das der Sicherstellung von professioneller Dateninterpretation in einigen Jahrzehnten und daran angedockter plausibler Entscheidungsvorbereitung abzeichnen, so ist es naheliegend, dass die interdisziplinäre Entsorgungsforschung den zugehörigen Wissenstand aufarbeitet und weiterentwickelt. Ein Beispiel in diesem Feld ist Forschung zur Kennzeichnung von nuklearen Tiefenlagern (Buser, 2013).
- Das Grundkonzept für die Evaluation der erhobenen Monitoring-Daten und zur Qualitätssicherung der Monitoring-Aktivitäten hat bereits in der Errichtungsphase zu erfolgen. Weil diese Arbeiten früh beginnen müssen, gilt gleiches auch für die Planung, die Überprüfung von Monitoring-Ergebnissen und komplementären Entscheidungen (wie die Wahl der Option Rückholung einzelner Abfallmargen oder mehr).
- Flexibilität, um in der Zukunft reagieren zu können, ist ein plausibles strategisches Ziel, auf das auch die Endlagerkommission abhebt. Das bedeutet in diesem Kontext, auf natürliche Prozesse im

⁵⁷Smeddinck, U., Semper, F. (2016): Long-term Governance aus rechtswissenschaftlicher Sicht. Workshop Technical Monitoring and Long-term Governance, Karlsruhe 18. - 19.10.2016

Untergrund reagieren zu können, die mit der Einlagerung nuklearer Abfälle zusammenhängen (Wärmeentwicklung, Geologie etc.). Es bedeutet aber auch, für menschliches Handeln – gerade bei Zeiträumen von mehreren Dekaden – organisatorische Vorkehrungen heute schon vorzuplanen. Wissen und Ressourcen sind zwei Faktoren. Ohne die Faktoren „Organisation“ und „Institutionalisieren“ zur Sicherung von Handlungsfähigkeit bleiben sie wegen der Notwendigkeit unfolgsamer Nebenfolgen⁵⁸ ein blinder Fleck im Pflichtenheft.

- Da Aufmerksamkeitsschwankungen aller beteiligten Akteure zu erwarten sind, ist die Vorausplanung „institutioneller Arrangements“ gerade bei Rückholbarkeit heute bereits zielführend. Da auch in modernen Gesellschaften die Handlungsfähigkeit auf Basis von Expertenwissen prekär sein kann, erscheint eine Einrichtung mit erweiterter Stewardship-Funktion als plausibler Ansatzpunkt. Diese ist nicht nur für Krisensituationen (Bürgerkriege, Naturkatastrophen etc.) auszulegen, sondern insbesondere für Entwicklungsszenarien, in denen die heutige gesellschaftliche Stabilität gehalten oder leicht verbessert werden kann.

Interdisziplinäre Verständigung zur Methodik der Entsorgungsforschung

Im Sammelband „Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle“ wurden Ansätze, Herausforderungen und Beispiele der interdisziplinären Zusammenarbeit in ENTRIA wissenschaftstheoretisch reflektiert. Dieses von Ulrich Smeddinck initiierte Vorhaben leistete insbesondere einen Beitrag zur Selbstverständigung innerhalb von ENTRIA über die Bedeutung interdisziplinärer Zusammenarbeit. In der interdisziplinären Diskussion der Beiträge zum Sammelband auf einem Autorenworkshop wurden fachliche Argumente pointiert und der Beitrag der verschiedenen Disziplinen zur Entsorgung deutlich. Für die Governance-Forschung ergaben sich vor allem interessante Diskussionen zu Fragen des Safety Case (Röhlig u. a., 2016) und der Wissensintegration (Grunwald, 2016b). Gerade komplexe Prozesse der Wissensintegration und die verschiedenen Eigenschaften unterschiedlicher Wissensbestände müssen in Governance-Prozessen, welche stark wissensbasierte Themen regulieren, einen angemessenen Raum finden.

⁵⁸Zur Unfolgsamkeit der Folgen siehe Gloede (2007).

5.2.6 Hauptergebnisse

Da die interdisziplinären Ergebnisse auf dem Forschungsstand und den hier ansetzenden disziplinären Qualifikationen aufbauen, werden zuerst die disziplinären Ergebnisse im Überblick dargestellt.

Ergebnisse aus den ITAS- und FFU-Modulen

E1) In den ITAS-AP wurde festgestellt, dass die Governance-Debatte insbesondere dann hilfreich ist, wenn der Fokus nicht auf der Effizienz des Regierungshandelns liegt, sondern auch die Qualität der Schnittstellen zwischen den Hauptakteuren in der jeweiligen Fachpolitik bedeutsam ist (Input-Legitimität) (Kuppler, 2017). Legitimität sollte in allen drei Phasen einer Entscheidungsfindung – Input, Throughput und Output – betrachtet werden. Wichtige Prinzipien der repräsentativen Demokratie, wie die Gleichheit aller und damit die Repräsentativität, dürfen hierbei nicht unberücksichtigt bleiben, um die Legitimität von Entscheidungen allgemein nicht zu mindern (Mbah, 2017).

E2) Beim Blick auf die Endlager-Governance sind zwei Governance-Dimensionen analytisch zentral: „Kooperation“ und „Koordination in Netzwerken“ (Haus, 2010). Mit dem Thema Kooperation wird hier explizit die Frage gestellt, inwiefern die zentralen Akteure bei der Lösung zusammenarbeiten; dabei geht es sowohl um formal-verantwortliche Regierungsorganisationen als auch um Stakeholder und Zivilgesellschaft (Hocke⁵⁹ (2017)). Dabei spielt die „Koordination“ in den entscheidungsnahen Netzwerken eine besondere Rolle, bei der die Frage der Ausgestaltung der Schnittstellen zwischen formellen und informellen Prozessen gestellt werden muss. Von besonderem Interesse ist dabei angesichts der Komplexität der Problematik die Pluralität der eingebundenen Akteure und betrachteten Problemaspekte. Institutionalisierte Räume für den Austausch zwischen verschiedenen Akteuren scheinen dabei notwendig zu sein.

E3) Staatliches Handeln, das um Governance-Dimensionen ergänzt wird, besteht in besonderer Weise in „diskursivem Handeln“. Das bedeutet, dass Argumentieren und Beraten sowie das Vorbereiten von Entscheidungen nicht nur durch Transparenz (Informationspolitik) vollzogen werden, sondern auch durch die Teilnahme an und Organisation von deliberativen Veranstaltungen und anderen Formaten, welche die Einbindung von Stakeholdern und der zivilgesellschaftlichen Öffentlichkeit sicherstellen (Hocke, 2015b). Ob und inwiefern dabei Output-Legitimität

⁵⁹Hocke, P. (2017): a. a. O.

erzeugt wird, hängt davon ab, wie Beteiligungsverfahren konkret umgesetzt werden und wie Ergebnisse dieser Verfahren in die Entscheidung einfließen (Mbah, 2017). Sofern kein genereller Umbau repräsentativer Entscheidungsverfahren in Richtung eines deliberativen oder partizipativen Demokratiemodells stattfindet und nur partiell Entscheidungsverfahren verändert werden, wie dies im Falle des Standortauswahlverfahrens mit dem StandAG erfolgt ist, kann nur eine fallspezifische Untersuchung erfolgen. Daher ist die Frage nach der Output-Legitimität im Kontext der Entsorgung radioaktiver Abfälle als empirisch offen zu bezeichnen (Grande, 2012).

E4) Unter Governance-Gesichtspunkten ist bezüglich des Standortauswahlgesetzes und der Arbeit des Nationalen Begleitgremiums festzuhalten, dass bei der Entsorgungspolitik stets ein erheblicher „Schatten der Hierarchie“ (Torfing, 2006) über der Ausgestaltung der zu koordinierenden Governance-Netzwerke liegt. Um bei diesen Koordinationen Erfolgchancen zu besitzen, müssen Verhandlungsbereitschaft und Ergebnisoffenheit gegenüber Stakeholdern und Öffentlichkeit signalisiert werden (Hocke u. Smeddinck, 2017). Gleichzeitig können Regierungsorganisationen ihre zentrale Rolle nicht aufgeben, da nur sie kollektiv verbindliche Entscheidungen umsetzen können.

E5) Mit der Neuauflage des Standortauswahlgesetzes wurde ein erster Schritt in Richtung Institutionalisierung von partizipativen Elementen gemacht (Hocke u. Smeddinck, 2017). Die Dimension der Kooperation ist hierbei jedoch nicht ausreichend berücksichtigt, denn Beteiligung der Öffentlichkeit muss über Information und Konsultation hinausgehen, um als solche wahrgenommen zu werden (Mbah, 2017). Hierbei gilt es Mechanismen zu entwickeln, Ergebnisse aus Beteiligungsverfahren in die Entscheidungsfindung zu integrieren, ohne das repräsentative Entscheidungsverfahren zu untergraben.

E6) Da unterschiedliche Mehrheiten auch weiterhin zu erwarten sind, muss in diesen Netzwerkaktivitäten mit Konflikten, aber auch sich abwechselnd öffnenden und schließenden Governance-Aktivitäten auch nach dem Start eines vergleichenden Standortauswahlverfahrens gerechnet werden (Hocke u. Kuppler, 2015; Kuppler, 2017). Die einschlägige Literatur legt nahe, dass es zentral ist, Methoden der Konfliktbearbeitung zu etablieren, die zur Handlungsfähigkeit der Regierung und ihrer operativen Kerne im Feld der Entsorgung beitragen (Warren u. Mansbridge, 2016) und gleichzeitig ausreichend Raum für Beratungen aller interessierten Akteure zur Vorbereitung von kollektiv verbindlichen Entscheidungen gewähren (Kuppler, 2016).

E7) Ausbalancierte Formen der Koordination sind bei allen Verfahrensschritten der Entsorgungspolitik wichtig, um ein ausreichendes Maß an Unterstützung für den nationalen Prozess zu erreichen: Angesichts der Realisierung über mehrere Jahrzehnte sind nicht nur heute schon ausreichende Ressourcen vorzusehen, sondern auch Planungen für eine anspruchsvolle Realisierung von Mehrebenen-Governance zu etablieren (Kuppler u. Hocke (2018), (Brunnengräber u. Mez, 2014, S. 395f)).

E8) Da Management-Konzepte (wie „radioactive waste management“) für das Ineinandergreifen verschiedener deliberativer Prozesse zur Entscheidungsvorbereitung und die Umsetzung von anstehenden Verfahrensschritten zu kurz greifen, wurde ein Perspektivwechsel vorgenommen. Jenseits von Gefahr und Risiko⁶⁰ sind die Schnittstellen zwischen den in jedem Fall beteiligten Teilsystemen (Politik, Wissenschaft, Wirtschaft, bürgerschaftliche Öffentlichkeit) von zentralem Interesse. Bei den Analysen zu den Schnittstellen ist ein Fokus darauf zu legen, dass eine sinnvolle Integration der Ergebnisse von Beteiligungsverfahren in offizielle demokratische Entscheidungsverfahren sichergestellt wird (Hocke, 2015a). Dies ist eine wichtige Voraussetzung dafür, um diesen Akteuren attraktive Angebote für kooperative Zusammenarbeit anzubieten und mit diesem Angebot bei gemeinsamen Beratungen das Handeln in Netzwerken zuverlässig gestalten zu können.

E9) In „spätmodernen Wissensgesellschaften“ haben sich die Strukturen von Entscheidungsvorbereitung und Schnittstellenhandeln zwischen einschlägigen Teilsystemen verändert ((Rosa, 2016, S. 699ff), Stehr (2003)). Auch in den Ingenieur- und Naturwissenschaften werden Aussagen aus dem akademischen „Mainstream“ zunehmend in Frage gestellt. „Expertendissens“ ist längst zu einem normalen Phänomen geworden (Grunwald, 2010b, S. 154f) und wird immer wieder als Deformation klassischer Wissenschaftsentwicklung kritisiert, ohne die Eigenlogik bei der Interpretation von Wissenskonflikten und sozialen Auseinandersetzungen ausreichend zu bedenken.

E10) Die Beschreibung der Entsorgungsproblematik als „komplexes“ Problem greift zu kurz. Dieses ist vielmehr als „sozio-technisches“ Problem zu verstehen, zu dessen Lösung gesellschaftliche Beratungen notwendig scheinen, welche aber gleichzeitig eine Lösung verzögern können (Hocke, 2016).

E11) Polarisierungen und Konfliktlinien der letzten Jahrzehnte bestehen im Kern auch im neuen Standortauswahlverfahren fort. Sie verweisen auf vier Defizite der deutschen Entsorgungspolitik. Erstens ist es den staatlichen Institutionen in den letzten Jahrzehnten nicht gelungen eine

⁶⁰Kritisch dazu siehe Bechmann (1993).

materiell erfolgreiche Endlager-Governance zu etablieren – nukleare Abfälle und Reststoffe wurden in großen Mengen produziert, ohne dass langfristige Einlagerungs- oder Behandlungsmöglichkeiten bestehen (vorliegendes Staatsversagen). Abgesehen davon konnte der Staat in den damit zusammenhängenden Konflikten nur begrenzt als Vermittler zwischen den Konfliktparteien auftreten, da er selbst als Vorhabenträger und Regulator fungiert und mit eigenen Interessen involviert ist. Zweitens ist die wissenschaftliche Forschung im Bereich der Endlagerung im Wesentlichen von der programmorientierten Forschungsförderung staatlicher Stellen (insbesondere des BMBF und des BMWi) abhängig und somit – mittelbar – durch staatliche Vorgaben bestimmt (Pfadabhängigkeit der Wissenschaft u. a. durch die Fokussierung auf eine tiefengeologische Entsorgungsstrategie ohne Vorkehrungen zu Rückholbarkeit im Wirtsgestein Steinsalz). Drittens verschlechtern sich die ökonomischen Bedingungen der Energieversorgungsunternehmen durch die Rahmenbedingungen der Energiewende (Aufspaltungen der Unternehmen). Darüber hinaus bestehen unterschiedliche Interessen zwischen Energieversorgungsunternehmen und kerntechnischer Industrie, weil letztere hofft, von Aufträgen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen und der Entsorgung nuklearer Abfälle zu profitieren. Viertens fällt es der Anti-Atom-Bewegung unter den neuen Randbedingungen schwer, eine kritisch-konstruktive Rolle einzunehmen und dabei entsprechend positive Ziele mittlerer Reichweite zu formulieren. In Reaktion darauf scheint das Mobilisierungspotential abzunehmen. Damit könnte zusammenhängen, dass sich bisher keine eindeutige Verhandlungsposition herauskristallisierte. Auch durch den derzeitig stabilen Beschluss, aus der Atomenergie auszusteigen ist eine Abnahme der Mobilisierungsfähigkeit der Bewegung zu erwarten, was deren Durchsetzungsfähigkeit verringert (Häfner, 2016a, S. 183f).

E12) Für die Lösung von „wicked problems“ kann grundsätzlich zwischen autoritären, kooperativen und wettbewerbsorientierten Ansätzen unterschieden werden (Roberts, 2000). Nur die kooperative Strategie scheint für die Standortsuche für ein Endlager von Relevanz. Nach allen – auch internationalen Erfahrungen – erscheint diese Strategie der sozio-politischen Inklusion, der Transparenz und der Teilhabe für den schwierigen Suchprozess durchaus erfolgversprechend (Brunnengräber u. Mez, 2014, S. 396). Dabei wird es zentral sein, den gesellschaftlichen Prozess flexibel genug zu gestalten, so dass Neujustierungen sowie eine Reformulierung der Bearbeitungsschritte und damit ein produktiver Umgang mit Konflikten dauerhaft möglich werden (Brunnengräber u. Mez, 2014, S. 398).

E13) Freiwilligkeit ist in Deutschland kein Kriterium der Standortauswahl und war bis 2017 nicht im Standortauswahlgesetz verankert (Willmann u. Schmidt, 2016). Der Begriff bzw. die damit verbundenen Konzepte können als Argumentations- und Klärungshilfe im öffentlichen Diskurs verstanden werden. Denn in Ländern, die in einer fortgeschrittenen Phase der Umsetzung sind, spielten freiwillige Elemente des Standortauswahlprozesses eine wichtige Rolle (Di Nucci u. Brunnengräber, 2017; Di Nucci u. a., 2017). Freiwilligkeit als Standortkriterium könnte als ein mögliches Signal an die Öffentlichkeit angesehen werden, sich am Standortauswahlprozess zu beteiligen. Anhand der Analyse von verschiedenen Fallstudien in der Europäischen Union (Brunnengräber u. a., 2015a) lassen sich Rahmenbedingungen erkennen, die zu „freiwilligen“ Reaktionen und Entscheidungen beigetragen haben. Diese sind: eine starke Identifikation mit der Nuklearindustrie („nuclear communities“), eine wirtschaftliche Marginalisierung und geographische Abgeschiedenheit der Region (nukleare Oasen) sowie wirtschaftliche Interessen und Abhängigkeiten, die durch die Nuklearindustrie und von der dadurch induzierten Wertschöpfungskette entstanden sind ((Brunnengräber u. Di Nucci, 2017, S. 143), Di Nucci (2016)).

E14) Die Prozesse, die zu einer Standortwahl für die Lagerung radioaktiver Abfälle führen, sind nicht gut vorhersehbar und konfliktbehaftet; sie können nicht durch einen eng definierten Planungsansatz gesteuert werden, in dem rein technische Probleme und Problemlösungen definiert und in aufeinanderfolgenden Schritten gelöst werden. Wegen der Komplexität und hoher Interdependenzen zwischen den sozialen und technischen Dimensionen des Problems können die negativen (lokalen) Reaktionen zu diesen Prozessen auch nicht despektierlich als NIMBY-Phänomen (NIMBY = Not In My Backyard) bezeichnet werden (Di Nucci, 2016, S. 137).

E15) Die Forschungsliteratur zeigt, dass das Akronym NIMBY im Wesentlichen eine breite Palette von Interessen und Motiven des antinuklearen Widerstands gegen viele verschiedene Arten von Großprojekten repräsentiert, die durch einen leichtfertigen Umgang mit dem NIMBY-Konzept verschleiert oder als egoistisch abgetan werden können. Empirische Untersuchungen zeigen, dass die Gründe für opponierendes Verhalten von psychologischen Faktoren, wie individueller oder kollektiver Angst um Risiken, Sorgen um Rückgang der Lebensqualität oder vor Stigmatisierung bis hin zu wirtschaftlichen Faktoren wie Sorge um den Rückgang der Immobilien- und Grundstückspreise reichen ((Di Nucci, 2016, S. 138), vgl. auch (Brunnengräber, 2015, S. 106). Die Ursachen für ablehnendes Verhalten können folglich nicht auf ein einfaches Reiz-Reaktionsschema reduziert werden, sondern sind in der Tat in einer spezi-

fischen Perspektive rational, anerkennungswürdig und politisch legitim. So liegt ein positiver Aspekt von NIMBY etwa darin, dass sich Bürgerinnen und Bürger durchaus ein gutes Verständnis der sozio-technischen Probleme erarbeiten können, um Sorgen mit Blick auf die Risiken für die Gemeinden angemessen zu äußern, die von technischen und administrativen Eliten in der Vergangenheit häufig ignoriert wurden. Eine breit angelegte lokale Opposition ist aus dieser Perspektive durchaus im öffentlichen Interesse (Di Nucci, 2016, S. 139).

E16) Wird das NIMBY-Konzept in der Politik als Handlungs- und Entscheidungsgrundlage herangezogen (und nicht als analytische Kategorie der Sozialwissenschaften zur Untersuchung von Akzeptanzproblemen verwendet), kann es schnell zu einer Entmündigung der jeweils betroffenen Bevölkerung führen (Brunnengräber, 2015, S. 107).

E17) Insgesamt lautet ein Ergebnis, dass Akzeptanz und damit die anzustrebende Akzeptabilität stark vom Zugang zu Informationen, frühzeitiger Einbindung der betroffenen Bevölkerung und Interessengruppen, Offenheit für unvorhergesehene Ergebnisse, Inklusivität des Prozesses und einer angemessenen finanziellen Ausstattung der Gemeinde abhängt. Daher sind vor allem inklusive Ansätze sowie die Transparenz des Verfahrens zentral, um konstruktive regionale Beteiligung zu fördern (Di Nucci, 2016, S. 139).

E18) Wie die Erfahrungen in verschiedenen Staaten gezeigt haben, sind auch Kompensationsleistungen, vertrauensbildende Maßnahmen und robuste Institutionen Bestandteil des politischen Kriterienkatalogs, der für den Standortauswahlprozess im Einzelnen noch zu entwickeln ist (Brunnengräber, 2016a, S. 162). In Schweden und Finnland gibt es bspw. Kompensationen, die auf lokaler Ebene zwischen den ausgewählten Gemeinden und der Nuklearindustrie verhandelt werden. Die Unterstützung von NGO, wie es zum Beispiel in Schweden der Fall war, trug dazu bei, dass das Vertrauen der Öffentlichkeit gewonnen und die Qualität der Entscheidungsfindungen verbessert werden konnte (Di Nucci u. Isidoro Losada, 2015).

E19) Aus den Studien zum NIMBY-Phänomen konnte weiterhin geschlossen werden, dass die Öffentlichkeit und die Gemeinden bei entsprechenden Kompensationen durchaus offen für einen Standort sein können, wenn die Vorbereitungs- und Aushandlungsprozesse von Anfang an transparent und offen gestaltet werden. So kann vermieden werden, dass Kompensationen als Ablasshandel, Bestechung oder unmoralisches Angebot angesehen werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass beide Faktoren der Standortbestimmung – Transparenz und Kompensationen – in einem schwierigen und komplexen Verhältnis zueinanderstehen

(Di Nucci, 2016). In Zukunft wird es darauf ankommen, diese Faktoren zu berücksichtigen und – unter größtmöglicher Beteiligung der Gesellschaft und in einem partizipativen Verfahren – so auszutarieren, dass die Suche nach einem Standort für die hoch radioaktiven Abfälle und Reststoffe zum Erfolg führen kann (Brunnengräber u. Di Nucci, 2017).

E20) Die empirische Evidenz zur Rolle von Kompensationen ist allerdings widersprüchlich. Es herrscht Meinungsverschiedenheit, ob eine entschädigungsbasierte Standortauswahl den Widerstand reduziert und zu lokaler Akzeptanz führt. Direkte monetäre Kompensationen für Individuen oder die Gemeinde können durchaus akzeptanzsteigernd wirken, während andere dagegenhalten, dass sie kontraproduktiv sein können und mit Bestechung gleichzusetzen seien. Allgemein gilt, dass Kompensationen und Entschädigungen als Ausgleich von Unausgewogenheit zwischen kollektivem Nutzen und lokalen Kosten zu einer individuellen Bereitschaft der lokal Betroffenen führen können.

E21) Kompensationen können dazu beitragen, mögliche Folgewirkungen aus dem Bau oder Betrieb einer Anlage zu mildern (z. B. Immobilienwertgarantien), tatsächliche oder vermeintliche Kosten im Falle eines Unfalles aufzufangen (z. B. Notfallfonds) oder die lokale Gemeinde für die getragenen Risiken und Belastungen durch den Bau und den Betrieb des Endlagers zu entschädigen (vgl. auch Carnes u. a. (1983). Eine nicht-monetäre Kompensation (z. B. durch öffentliche Güter) stößt dabei in der Regel auf eine höhere Akzeptanz und wird als angemessener wahrgenommen (Di Nucci, 2016, S. 138)⁶¹. Designierten Standorten und deren umliegenden Gemeinden kann auch eine Verbesserung der Infrastruktur angeboten werden (z. B. Bau von Straßen, Schwimmbädern oder Kulturzentren) oder auf die Bereitstellung öffentlicher Güter oder arbeitsmarktpolitische Maßnahmen zur Entwicklung der Region abzielen (Di Nucci, 2016). Richardson unterscheidet bei Kompensationen je nach ihrer Verwendung zwischen „Gemeinschaftsleistungen“ (community benefits) „Sozialleistung-Maßnahmen“ und „Community-Empowerment-Maßnahmen“ (Richardson, 2010).

E22) Eine eingehende Diskussion darüber, ob es „reine“ Freiwilligkeit oder „gekaufte“ Freiwilligkeit überhaupt geben kann, oder über eine moralisch-ethische Bewertung (Willmann u. Schmidt, 2016) ist auf Grundlage des bisherigen Forschungsstandes nicht zufriedenstellend zu erörtern. Eine vertiefte Diskussion dieser Aspekte ist an anderer Stelle zu führen.

E23) Weiterhin steht die Frage im Raum, inwiefern sozio-kulturelle Faktoren wie „Vertrauen“, aber auch „Transparenz“ bei Entscheidungspro-

⁶¹ Vgl. hierzu auch Bacot u. a. (1994); Claro (2007); Jenkins-Smith u. Kunreuther (2001); Kunreuther u. Easterling (1996); Kunreuther u. a. (1990).

zessen für eine erfolgreiche Standortsuche ausschlaggebend sein können. Dabei wurde auf die Erfahrung der Länder zurückgegriffen, die in einer fortgeschrittenen Phase des Suchprozesses sind und deren Lösungsansätze komparativ analysiert wurden (Di Nucci u. a., 2017; Di Nucci u. Brunnengräber, 2017). In der Zusammenschau kann geschlussfolgert werden, dass die Unterstützung der potenziellen Standortgemeinden nicht (ausschließlich) auf Entschädigung basieren kann. Die Erfahrungen der skandinavischen Länder zeigen vielmehr, dass ein weiteres Kernelement das Vertrauen in die Institutionen darstellt und dass die Bereitschaft, Verhandlungen und Vereinbarungen an die Gemeinden zu delegieren, vorhanden sein sollte. Dies bedeutet jedoch auch, dass die lokalen Behörden in der Lage sein müssen, Verhandlungen zu führen, was wiederum von deren Kompetenzen und Ressourcen abhängig ist. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Bevölkerung in Frankreich und Deutschland der politischen Elite in besonderer Weise misstraut, während in den skandinavischen Ländern Elemente der ‚Konsens-Demokratie‘ und ein größeres Vertrauen in die staatlichen Institutionen anzutreffen sind (Di Nucci u. a., 2015).

Ergebnisse Promotionsvorhaben (ITAS, FFU)

E24) Deliberative Ereignisse haben Effekte unterschiedlichen Ausmaßes auf Entscheidungen (Kuppler, 2017). Verantwortlich für den davon ausgehenden Wandel der modernisierten Endlagerpolitiken ist erstens die Einrichtung institutionalisierter Räume für die Diskussion zwischen zentralen kollektiven Akteuren, in denen auch schwierige Dialoge über Unsicherheiten wissenschaftlichen Wissens geführt und dabei die politische Dimension derselben beraten werden können. Zweitens ist die Entwicklung eines Verständnisses von Transparenz notwendig, das Spielräume für offene Beratung und gleichzeitig das Schließen von Diskursen erlaubt, ohne die Suche nach Kompromissen aufzugeben.

E25) Das „Nicht-Wissbare“ und das „Nicht-abschließend-Wissbare“ ist Teil politischer Aushandlungsprozesse (vgl. Böschen u. Wehling (2004)), so auch in der Entsorgungspolitik Schwedens (Wulf, 2015). Mittels prozessualer Aufgliederung der Endlagerung in Prozessphasen – wie auch in Deutschland vorgenommen – mit je spezifischen Risikoabwägungen, soll die Komplexität des Problems reduziert werden. Dadurch wird eine Handhabmachung proklamiert und von irreduziblen Nichtwissens-Beständen abgelenkt. Nichtwissen wird in Schweden häufig und in heterogener Weise thematisiert und als politische Ressource verwendet, um die Notwen-

digkeit weiterer Forschung zu alternativen Endlagerungskonzepten zu betonen.

E26) Die empirischen Ergebnisse unterstreichen den Bedarf einer verlässlichen und gleichermaßen robusten Endlager-Governance. Die Mehrzahl der Befragten regionalen Akteure erwartet neue Formen des Regierens, eine breite und qualitativ hochwertige Bürgerbeteiligung sowie faire Verhandlungsprozesse zwischen Entscheidungsträgerinnen und -trägern und Betroffenen. Insbesondere lokal Betroffenen sollten verbindliche und effektive Formen der Einflussnahme geboten werden, die über bisher institutionalisierte Beteiligungsformen (z. B. Anhörung, Erörterung) hinausgehen. Neutrale Dritte (z. B. Mediatorinnen und Mediatoren) sollten etwaige Konflikte vor Ort moderieren und faire Aushandlungsprozesse befördern. Eine historische Aufarbeitung des Entsorgungskonflikts erscheint insofern erforderlich, als die Beurteilung der gegenwärtigen Politik oft von hohem Misstrauen geprägt ist, das in alten Konflikten und Wertverletzungen wurzelt Drögemüller (2018).

E27) Die Planung kerntechnischer Anlagen geht insbesondere für die (potenziell) betroffenen Personen mit einer Irritation in der Lebenswelt einher. Eine Spezifik ist dabei in der unterschiedlichen Risikowahrnehmung ionisierender Strahlung durch unterschiedliche Akteure (und dadurch der Entstehung von Betroffenheit) zu sehen, die unter anderem auf verschiedene Annahmen von Experten (Expertendissens) zur Auswirkung von Niedrigdosisstrahlung zurückgeht und bis heute wissenschaftlich nicht abschließend entschieden werden kann. In der Folge zeichnen sich unter den Teilnehmerinnen und Teilnehmern des Diskurses Argumentationsmuster ab, die sich zunehmend um verschiedene Kernüberzeugungen gruppieren und zur unterschiedlichen Konstruktion von Betroffenheit(en) führen.

Ergebnisse aus interdisziplinären Kooperationen (ITAS, FFU, IRW)

E28) Das novellierte Standortauswahlgesetz stellt aus politik- und rechtswissenschaftlicher Perspektive einen Paradigmenwechsel dar und kann daher als soziale Innovation gewertet werden. Mit dem Standortauswahlgesetz erfolgt jedoch keine generelle Abkehr von traditionellen Entscheidungsprozeduren. Die Öffentlichkeitsbeteiligung wird durch eine Regulierung ausgeweitet und gestärkt, bleibt jedoch auf der Ebene der Information und Konsultation verhaftet und stellt kein verbindliches Angebot zur Mitsprache und Mitentscheidung dar (Hocke u. Smeddinck, 2017).

E29) In dem Sammelband von Smeddinck u. a. (2016) zu „Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe“ sind die

Forschungsstände unterschiedlicher Disziplinen in Bezug auf die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle dargestellt sowie Möglichkeiten inter- und transdisziplinärer Zusammenarbeit aus disziplinspezifischer Sicht herausgearbeitet. Der Sammelband weist damit eine wichtige Selbstverständigungsfunktion auf. Der Beitrag von Grunwald (2016b) zur Wissensintegration unterscheidet drei Ebenen der Integration von Wissen – die interdisziplinäre, die transdisziplinäre und die prozedurale –, die notwendig sind, um Orientierungen und Handlungswissen zur Lösung komplexer gesellschaftlicher Probleme bereitzustellen. Auf der interdisziplinären Ebene muss geprüft werden, inwiefern Wissensbestände in Wechselwirkung zueinanderstehen und ob dadurch Inkonsistenzen und Widersprüche auftreten können. Die transdisziplinäre Ebene dient dazu, eine Perspektivenvielfalt auf eine spezifische Problemstellung zu erhalten und somit Argumente zu schärfen, die als Basis für eine Akzeptanz in der gewählten Entsorgungsstrategie dienen können. Die prozedurale Ebene muss der engen Verbindung von epistemischen und politischen Prozessen gerecht werden, indem in Form eines Assessment-Prozesses die Argumente der inter- und transdisziplinären Ebene hinsichtlich ihrer Notwendigkeit und Ausprägung von Integration überprüft, integriert und in Entscheidungen überführt werden (Grunwald, 2016b).

E30) Viele Fragen der Beteiligung von Öffentlichkeit und Stakeholdern bleiben bisher noch offen und müssen in Zukunft präzisiert sowie entsprechende Arbeitsmodi etabliert werden, die einen breiten Konsens in der Bevölkerung finden. Bei dem Vergleich zwischen der Schweiz und Deutschland fällt auf, dass auch im Schweizer Verfahren nur temporär gültige Antworten gefunden worden sind und Fragen des Machtungleichgewichts sowie die konkrete Ausgestaltung und auch Verbesserung der Arbeit in den Regionalkonferenzen und des Wissenstransfers über lange Zeiträume noch ungelöste Fragen sind. Partizipation dient dazu, einen „Ort“ zu etablieren, an dem Konflikte auf konstruktive Art ausgetragen werden können (Drögemüller u. Kuppler, 2017a).

E31) Im Entsorgungskontext zeigen sich neue politische Mobilisierungsprozesse. Die Akteurslandschaft hat sich sehr verändert, besonders die Kommunen, die Standorte von Kernkraftwerken sind, positionieren sich klar und bringen sich stark in die politische Debatte ein. Die vielfältigen Akteure der Anti-AKW-Bewegung einte bisher vor allem das „Dagegen-Sein“. Bei der Standortsuche für ein nukleares Endlager muss jedoch ein gesellschaftliches „Dafür-Sein“ hinzugefügt werden, wodurch innerhalb der Akteurslandschaft neue Auseinandersetzungen entstehen. Parallel zu dieser Mobilisierung eines „Dafür-Seins“ (z. B. im Rahmen der

Endlagerkommission, siehe Schreurs⁶² (2017)) entwickelt sich eine kritische, von der Mitarbeit distanzierende Anti-Endlager-Bewegung. Die Mobilisierung führt folglich zu einer neuen Gemengelage von alten und neuen Akteuren, die sich neu aufstellen und woraus sich neue Konfliktkonstellationen, aber auch Gelegenheitsfenster ergeben (Brunnengräber u. Hocke, 2014).

E32) Der Safety Case als Produkt disziplinärer und interdisziplinärer Zusammenarbeit dient als Instrument in einem gesellschaftlichen Prozess der Entscheidungsfindung. Der Safety Case basiert zwar im Kern auf naturwissenschaftlich-ingenieurtechnischen Modellen und Simulationen und stellt damit eine professionelle Abschätzung der Sicherheit eines tiefergeologischen Endlagers dar, jedoch prägt das Zusammenwirken und das Auseinandersetzen zwischen Entscheidungsträgern und anderen Stakeholdern wesentlich den Inhalt des Safety Case. Letztere verbessert den Safety Case laufend. An dieser Stelle wird deutlich, dass eine zu einfache Öffnung der Aushandlungsprozesse zwischen Antragsteller und Entscheidungsträger nicht ausreichend ist. Daher ist eine sozialwissenschaftliche Erweiterung hinsichtlich Politik, Stakeholder und interessierter Öffentlichkeit wichtig, um diverse Wissensbestände in die Aushandlungsprozesse einzubeziehen. Offen bleibt, inwiefern die interessierte Öffentlichkeit Einfluss auf die Erstellung des Safety Case haben sollte und wie diese Aushandlungsprozesse weiteren Stakeholdern und der interessierten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden könnten. Dies stellt die Aushandlungsprozesse um den Safety Case eines tiefergeologischen Endlagers und die involvierten Akteure vor allem vor kommunikative und dialogische Herausforderungen (Hocke u. Röhlig, 2014; Röhlig u. a., 2016).

E33) Die Analyse des Beteiligungskonzeptes der Endlagerkommission und des Kontextes, innerhalb dessen die Kommissionsarbeit stattfand, zeigt, dass die Formatwahl und der Anspruch mittels eines dialogorientierten Partizipationsverfahrens Ergebnisse zu produzieren nicht mit dem sehr begrenzten Zeitrahmen der Kommissionsarbeit abgestimmt war. Es wurde zu wenig berücksichtigt, dass qualitativ hochwertige Öffentlichkeitsbeteiligung und damit das Hören zahlreicher Stimmen Zeit benötigt. Darüber hinaus war der Anspruch formuliert worden, dass die unterschiedlichen Zielgruppen auf Augenhöhe eingebunden werden sollen, was voraussetzt, dass der „Knowledge-Gap“ (Gallego Carrera u. Hocke, 2016, S. 104) durch anspruchsvolle Veranstaltungsformate ausgeglichen wird. Das von dem Partizipationsdienstleister Demos/Prognos vorgelegte

⁶²Schreurs, M. A. (2017): Participation, Risk and Democracy: Selection Process for a New Site in Germany. ENTRIA final conference. Braunschweig, 26.09.2017

Beteiligungskonzept beinhaltete jedoch eine Formatvielfalt, ohne eine ausreichende Verzahnung dieser einzelnen Formate zu gewährleisten, um so eine Ergebnisentwicklung zu ermöglichen. Auch war die Vielzahl der Formate nicht auf die spezifischen Zielgruppen abgestimmt, weshalb hier das Fazit gezogen wird, dass häufig „weniger mehr ist“, d. h. dass ein Beteiligungskonzept basierend auf weniger Formaten, dafür aber auf die Zielgruppen abgestimmt, professionell vorbereitet, durchgeführt und nachbereitet, die Ergebnisse der Kommission qualitativ aufgewertet hätte (Gallego Carrera u. Hocke, 2016).

E34) In der interdisziplinären Auseinandersetzung mit Grenzwerten im Umgang mit radioaktiven Reststoffen hat sich gezeigt, wie soziale Prozesse auf Formulierungen von Grenzwerten Einfluss nehmen. Grenzwerte basieren nicht allein auf naturwissenschaftlichen Modellen und Berechnungen, sondern sind sozial konstruiert, da sie durch gesellschaftliche und politische Aushandlungsprozesse zwischen unterschiedlichen Akteuren wesentlich beeinflusst werden und veränderlich sind (Brunnengräber u. a., 2016).

E35) Der Standortsuchprozess für ein nukleares Endlager ist in Deutschland historisch durch einige Meilensteine und Wendepunkte gekennzeichnet. Besonders bedeutsam für einen Wandel im Standortsuchverfahren und für die Modernisierung von Entscheidungs- und Steuerungsprozessen in der Entsorgungspolitik waren Veränderungen von politischen Mehrheiten und externe Ereignisse, wie beispielsweise die verheerenden Nuklearunfälle in Harrisburg / Pennsylvania 1979, Tschernobyl 1986 und Fukushima 2011 (Hocke u. Kallenbach-Herbert, 2015). Durch die genannten Unfälle erstarkten die Anti-AKW-Bewegung und damit der öffentliche Druck auf die Entscheidungsträger, die schließlich zum Atomausstieg führten. Der Wechsel in den politischen Mehrheiten ermöglichte die Einigung auf ein neues Standortsuchgesetz, das Standortauswahlgesetz, und ein neuartiges, partizipativ-konsultatives Verfahren durch die Endlagerkommission.

E36) Jedes Bergwerk stellt als technologisches Artefakt einen massiven Eingriff in das natürliche geologische System dar. Daraus entstehen neben der regulären Entwicklung des Endlagersystems mit seinen Barrieren auch nicht-intendierte Folgen, denen adäquat begegnet werden muss. Die tiefengeologische Entsorgung von hoch radioaktiven Abfällen basiert größtenteils auf Berechnungen und Modellen, die keine abschließenden Aussagen zur Zuverlässigkeit der natürlichen und künstlichen Barrieren geben können. Nach heutigem Stand der Forschung können geotechnische Maßnahmen nach technischen Eingriffen nur bedingt die ursprüngliche mechanische und hydraulische Qualität der geologischen Systeme wiederherstellen (Mbah, 2016). Die Reduzierung von bestehenden Ungewissheiten und der Umgang mit noch grundsätzlich wohl auch verbleibenden Ungewissheiten sind daher essentieller Teil von Forschung und Langzeitsicherheitsanalysen. Es muss in vielen Fällen nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik, trotz des unvollständigen Wissens, eine Entscheidung getroffen werden.

Literatur

- [acatech 2012] acatech (Hrsg.): *Technikzukünfte: Vorausdenken - Erstellen - Bewerten*. Berlin: Springer Vieweg, 2012 (acatech-IMPULS)
- [Bacot u. a. 1994] Bacot, Hunter; Bowen, Terry; Fitzgerald, Michael R.: Managing the Solid Waste Crisis. Exploring the Link Between Citizen Attitudes, Policy Incentives, and Siting Landfills. In: *Policy Studies Journal* 22 (1994), Juni, Nr. 2, S. 229–244
- [Balint u. a. 2011] Balint, Peter J.; Stewart, Ronald E.; Desai, Anand; Walters, Lawrence C.: *Wicked environmental problems: managing uncertainty and conflict*. Washington, DC: Island Press, 2011
- [Bechmann 1993] Bechmann, Gotthard: *Risiko und Gesellschaft. Grundlagen und Ergebnisse interdisziplinärer Risikoforschung*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1993
- [Bechmann u. Stehr 2000] Bechmann, Gotthard; Stehr, Nico: Risikokommunikation und die Risiken der Kommunikation wissenschaftlichen Wissens: Zum gesellschaftlichen Umgang mit Nichtwissen. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 9 (2000), Nr. 2, S. 113–121

- [Bergmans u. a. 2015] Bergmans, Anne; Sundqvist, Göran; Kos, Drago; Simmons, Peter: The Participatory Turn in Radioactive Waste Management: Deliberation and the Social-Technical Divide. In: *Journal of Risk Research* 18 (2015), Nr. 3, S. 347–363
- [Blowers 2016] Blowers, Andrew: *The Legacy of Nuclear Power*. London, New York: Routledge, 2016
- [Bogner u. Torgersen 2005] Bogner, Alexander (Hrsg.); Torgersen, Helge (Hrsg.): *Wozu Experten? Ambivalenzen der Beziehung von Wissenschaft und Politik*. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2005
- [Brand u. Honolka 1987] Brand, Karl-Werner; Honolka, Harro: *Ökologische Betroffenheit, Lebenswelt und Wahlentscheidung: Plädoyer für eine neue Perspektive der Wahlforschung am Beispiel der Bundestagswahl 1983*. Opladen: Westdeutscher Verlag, 1987
- [Brans u. a. 2015] Brans, M.; Ferraro, G.; Estorff, U.; European Commission (Hrsg.); Joint Research Centre (Hrsg.); Institute for Energy and Transport (Hrsg.): *The OECD Nuclear Energy Agency's Forum on Stakeholder Confidence, radioactive waste management and public participation: A synthesis of its learnings and guiding principles*. Luxembourg: Publications Office, 2015
- [Brunnengräber 2013] Brunnengräber, Achim: Die Anti-AKW-Bewegung im Wandel. Neue Herausforderungen durch die Endlagersuche für radioaktive Abfälle. In: *Forschungsjournal Soziale Bewegungen - PLUS* 26 (2013), Nr. 3
- [Brunnengräber 2015] Brunnengräber, Achim: *Ewigkeitslasten. Die „Endlagerung“ radioaktiver Abfälle als soziales, politisches und wissenschaftliches Projekt*. Baden-Baden: edition sigma, 2015
- [Brunnengräber 2016a] Brunnengräber, Achim: Das wicked problem der Endlagerung. Zehn Charakteristika des komplexen Umgangs mit hochradioaktiven Reststoffen. (Brunnengräber, 2016c), S. 145–166
- [Brunnengräber 2016b] Brunnengräber, Achim: Die atompolitische Wende. Paradigmenwechsel, alte und neue Narrative und Kräfteverschiebungen im Umgang mit radioaktiven Abfälle. (Brunnengräber, 2016c), S. 13–32

- [Brunnengräber 2016c] Brunnengräber, Achim (Hrsg.): *Problemfälle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll*. Baden-Baden: edition sigma, 2016
- [Brunnengräber u. Di Nucci 2017] Brunnengräber, Achim; Di Nucci, Maria R.: Freiwilligkeit als Königsweg bei der Standortsuche für radioaktive Reststoffe? In: *Kursbuch Bürgerbeteiligung #2* Bd. 2. Berlin: Institut für Partizipation, 2017, S. 139–157
- [Brunnengräber u. a. 2014a] Brunnengräber, Achim; Di Nucci, Maria R.; Häfner, Daniel; Isidoro Losada, Ana M.; Mez, Lutz: Nuclear Waste Governance - ein wicked problem der Energiewende. In: *Im Hürdenlauf zur Energiewende. Von Transformationen, Reformen und Innovationen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 389–399
- [Brunnengräber u. a. 2015a] Brunnengräber, Achim (Hrsg.); Di Nucci, Maria R. (Hrsg.); Isidoro Losada, Ana M. (Hrsg.); Mez, Lutz (Hrsg.); Schreurs, Miranda A. (Hrsg.): *Nuclear Waste Governance. An International Comparison*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015
- [Brunnengräber u. a. 2018] Brunnengräber, Achim (Hrsg.); Di Nucci, Maria R. (Hrsg.); Isidoro Losada, Ana M. (Hrsg.); Mez, Lutz (Hrsg.); Schreurs, Miranda A. (Hrsg.): *Challenges of Nuclear Waste Governance. An International Comparison (Vol. II)*. Bd. 2. Wiesbaden: Springer VS, 2018
- [Brunnengräber u. Hocke 2014] Brunnengräber, Achim; Hocke, Peter: Bewegung Pro-Endlager? Zum soziotechnischen Umgang mit hochradioaktiven Reststoffen. In: *Forschungsjournal Soziale Bewegungen* 27 (2014), Nr. 4, S. 59–70
- [Brunnengräber u. a. 2015b] Brunnengräber, Achim; Hocke, Peter; Kalmbach, Karena; König, Claudia; Röhlig, Klaus-Jürgen; Kuppler, Sophie; Smeddinck, Ulrich; Walther, Clemens: Grenzwerte beim Umgang mit radioaktiven Reststoffen. Arbeitsbericht des ENTRIA-Transversalprojekts 2. 2015 – Interner Bericht
- [Brunnengräber u. a. 2016] Brunnengräber, Achim; Hocke, Peter; Kalmbach, Karena; König, Claudia; Röhlig, Klaus-Jürgen; Kuppler, Sophie; Smeddinck, Ulrich; Walther, Clemens: Grenzwerte beim Umgang mit radioaktiven Reststoffen. Arbeitsbericht des ENTRIA-Transversalprojekts 2 (Überarbeitete Version). 2016 (1) – Interner Bericht

- [Brunnengräber u. Häfner 2015] Brunnengräber, Achim; Häfner, Daniel: Machtverhältnisse in der Mehrebenen-Governance der „nuklearen Entsorgung“. In: Partzsch, Lena (Hrsg.); Weiland, Sabine (Hrsg.): *Macht und Wandel in der Umweltpolitik*. 1. Aufl. Baden-Baden: Nomos, 2015, S. 55–72
- [Brunnengräber u. Mez 2014] Brunnengräber, Achim; Mez, Lutz: Strahlende Hinterlassenschaften aus Produktion und Konsumtion. Zur Politischen Ökonomie des Atommülls. In: *PROKLA. Zeitschrift für kritische Sozialwissenschaft* 44 (2014), Nr. 3, 371–382. <http://prokla.com/wp/wp-content/uploads/2014/Prokla176.pdf>
- [Brunnengräber u. Mez 2016] Brunnengräber, Achim; Mez, Lutz: Der staatlich-industrielle Atomkomplex im Zerfall. Zur politischen Ökonomie der Endlagerung in der Bundesrepublik Deutschland. In: Brunnengräber, Achim (Hrsg.): *Problemfälle Endlager - Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll*. Baden-Baden: edition sigma, 2016, S. 289–311
- [Brunnengräber u. a. 2014b] Brunnengräber, Achim; Mez, Lutz; Di Nucci, Maria R.; Häfner, Daniel; Isidoro Losada, Ana M.: Nuclear Waste Governance – ein wicked Problem der Energiewende. In: Brunnengräber, Achim (Hrsg.); Di Nucci, Maria R. (Hrsg.): *Im Hürdenlauf zur Energiewende. Von Transformationen, Reformen und Innovationen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 389–399
- [Brunnengräber u. Syrovatka 2016] Brunnengräber, Achim; Syrovatka, Felix: Konfrontation, Kooperation oder Kooptation? Staat und Anti-Atom-Bewegung im Endlagersuchkonzept. In: *Prokla Zeitschrift für kritische Sozialwissenschaft* 184 (2016), Nr. 46, S. 383–402
- [Bull 2015] Bull, Hans P.: Was ist die Öffentlichkeit und welche Befugnisse soll sie haben? Zum Demokratieverständnis zivilgesellschaftlicher Verbände – am Beispiel des Auswahlverfahrens für ein Atommüll-Endlager. In: *Deutsches Verwaltungsblatt DVBl* 130 (2015), Nr. 10, S. 593–656
- [Bundesamt für Strahlenschutz 2002] Bundesamt für Strahlenschutz (Hrsg.): *Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte*. Köln, 2002
- [Buser 2013] Buser, Marcos: *Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations (RK&M). A Literature Survey on Markers and Memory Preservation for Deep Geological Repositories*. Zürich: NEA, 2013 (NEA/RWM/R(2013)5)

- [Böhle u. Weihrich 2009] Böhle, Fritz; Weihrich, Margit: *Handeln unter Unsicherheit*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009
- [Böschen u. Wehling 2004] Böschen, Stefan (Hrsg.); Wehling, Peter (Hrsg.): *Wissenschaft zwischen Folgenverantwortung und Nichtwissen: aktuelle Perspektiven der Wissenschaftsforschung*. 1. Aufl. Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss, 2004
- [Böschen u. Wehling 2012] Böschen, Stefan; Wehling, Peter: Neue Wissensarten: Risiko und Nichtwissen. In: Maasen, Sabine (Hrsg.): *Handbuch Wissenschaftssoziologie*. Wiesbaden: Springer VS, 2012, S. 317–327
- [Carnes u. a. 1983] Carnes, Sam A.; Copenhaver, Emily D.; Sorensen Jon H.; Sonderstrom, E. J.; Reed, John H.; Bjornstad, D. J.; Peelle, Elizabeth: Incentives and Nuclear Waste Siting: Prospects and Constraints. In: *Energy System and Policy* 7 (1983), S. 323–351
- [Claro 2007] Claro, Edmundo: Exchange Relationships and the Environment: The Acceptability of Compensation in the Siting of Waste Disposal Facilities. In: *Environmental Values* 16 (2007), Nr. 2, S. 187–208
- [Corbin u. Strauss 1990] Corbin, Juliet M.; Strauss, Anselm L.: *Basics of Qualitative Research. Grounded Theory: Procedures and Techniques*. Thousand Oaks, CA: SAGE, 1990
- [Crouch 2004] Crouch, Colin: *Post-Democracy*. Cambridge: Polity Press, 2004
- [StandAG 2017] Deutscher Bundestag: *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG)*. Juli 2017 – Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- [Di Nucci 2016] Di Nucci, Maria R.: NIMBY oder IMBY: Akzeptanz, Freiwilligkeit und Kompensationen in der Standortsuche für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. In: (Brunnengräber, 2016c), S. 119–143
- [Di Nucci u. Brunnengräber 2017] Di Nucci, Maria R.; Brunnengräber, Achim: In whose backyard? The wicked problem of siting nuclear waste repositories. In: *European Policy Analysis EPA – special issue „Infrastructure policy-making: between regional interests and societal goals?“* 3 (2017), Nr. 2, S. 295–323

- [Di Nucci u. a. 2017] Di Nucci, Maria R.; Brunnengräber, Achim; Isidoro Losada, Ana M.: From the „right to know” to the „right to decide”. A Comparative Perspective on Participation and Acceptance in Siting Procedures for HLW repositories. In: *Progress in Nuclear Energy* (2017), Nr. 100, S. 316–326
- [Di Nucci u. Isidoro Losada 2015] Di Nucci, Maria R.; Isidoro Losada, Ana M.: An Open Door for Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Export? In: (Brunnengräber u. a., 2015a), S. 79–97
- [Di Nucci u. a. 2015] Di Nucci, Maria R.; Isidoro Losada, Ana M.; Brunnengräber, Achim: Same, Same but Different - A Comparative Perspective on Participation and Acceptance in Siting Procedures for HLW repositories in France, Sweden and Finland. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2015, S. 42–48
- [Dryzek 2013] Dryzek, John S.: *The Politics of the Earth. Environmental Discourses*. 3rd ed. Oxford: Oxford Univ. Press, 2013
- [Drögemüller 2016] Drögemüller, Cord: Das Standortauswahlverfahren. Kommunen und BürgerInnen in der Endlager-Governance. In: (Brunnengräber, 2016c), S. 187–210
- [Drögemüller 2018] Drögemüller, Cord: *Schlüsselakteure der Endlager-Governance. Entsorgungsoptionen und -strategien aus Sicht regionaler Akteure*. Wiesbaden: Springer VS, 2018
- [Drögemüller u. Kuppler 2017a] Drögemüller, Cord; Kuppler, Sophie: Bürger(innen) auf Standortsuche. Erwartungen in Deutschland, Erfahrungen aus der Schweiz. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2017), Nr. 2, S. 121–124
- [Drögemüller u. Kuppler 2017b] Drögemüller, Cord; Kuppler, Sophie: Bürger(innen) auf Standortsuche. Erwartungen in Deutschland, Erfahrungen aus der Schweiz. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 2017 (2017), Nr. 2, S. 121–124
- [Endlagerkommission 2016] Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Hrsg.). Deutscher Bundestag: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Verantwortung für die Zukunft: Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes / Deutscher Bundestag. Berlin, 2016 (18/9100) – Bundestagsdrucksache – 684 S.

- [Esser 2000] Esser, Hartmut: *Soziales Handeln*. Frankfurt/M.: Campus, 2000
- [Fontana u. a. 2008] Fontana, Marie-Christine; Afonso, Alexandre; Papadopoulos, Yannis: Putting the Special Case in Its Place: Switzerland and Small-N Comparison in Policy Research. In: *Swiss Political Science Review* 14 (2008), Nr. 3, S. 521–550
- [Gallego Carrera u. Hocke 2016] Gallego Carrera, Diana; Hocke, Peter: Die Endlager-Kommission und ihr Konzept von Öffentlichkeitsbeteiligung in einem engen Zeitfenster. Denkanstöße und Implikationen zum Beteiligungsformat von Demos/Prognos für die Kommission. In: Müller, Monika C. (Hrsg.): *Endlagersuche*. Loccum, 2016 (Loccumer Protokolle), S. 103–118
- [George u. Bennett 2005] George, Alexander L.; Bennett, Andrew: *Case studies and theory development in the social sciences*. Cambridge, MA: MIT Press, 2005 (BCSIA studies in international security)
- [Gerhards 1993] Gerhards, Jürgen: *Studien zur Sozialwissenschaft*. Bd. 130: *Neue Konfliktlinien in der Mobilisierung öffentlicher Meinung: eine Fallstudie*. Opladen: Westdeutscher Verlag, 1993
- [Gethmann 1982] Gethmann, Carl F.: Proto-Ethik. Zur formalen Pragmatik von Rechtfertigungsdiskursen. In: Stachowiak, Herbert (Hrsg.); Ellwein, Thomas (Hrsg.): *Bedürfnisse, Werte und Normen im Wandel*. München, Paderborn: Fink, 1982, S. 113–143
- [Gloede 2007] Gloede, Fritz: Unfolgsame Folgen: Begründungen und Implikationen der Fokussierung auf Nebenfolgen bei TA. In: *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis (TaTuP)* 16 (2007), Nr. 1, S. 45–54
- [Grande 2012] Grande, Edgar: Governance-Forschung in der Governance-Falle? – Eine kritische Bestandsaufnahme. In: *Politische Vierteljahresschrift* 53 (2012), Nr. 4, S. 565–592
- [Grunwald 2010a] Grunwald, Armin: Ethische Anforderungen an nukleare Endlager: Der ethische Diskurs und seine Voraussetzungen. In: *Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Gesellschaftliche Erwartungen und Anforderungen an die Langzeitsicherheit*. Karlsruhe, Berlin, Bonn, 2010, S. 73–84
- [Grunwald 2010b] Grunwald, Armin: *Technikfolgenabschätzung: eine Einführung*. Zweite, grundlegend überarbeitete und wesentlich erweiterte Aufl. Berlin: edition sigma, 2010 (Gesellschaft, Technik, Umwelt N.F., 1)

- [Grunwald 2016a] Grunwald, Armin: Der lange Weg zum Konsens. In: *Politische Ökologie* 34 (2016), Nr. 9, S. 124–127
- [Grunwald 2016b] Grunwald, Armin: Wissensintegration auf dem Weg zur Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>. In: (Smeddinck u. a., 2016), 111–119
- [Habermas 1992] Habermas, Jürgen: *Faktizität und Geltung. Beiträge zur Diskurstheorie des Rechts und des demokratischen Rechtsstaats*. 1. Aufl. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1992
- [Haus 2010] Haus, Michael: *Transformation des Regierens und Herausforderungen der Institutionenpolitik*. 1. Aufl. Baden-Baden: Nomos, 2010 (Modernes Regieren Bd. 5)
- [Hocke 2006] Hocke, Peter: Expertenkommunikation im Konfliktfeld der nuklearen Entsorgung in öffentlichkeitssoziologischer Perspektive. Zum Wandel von Expertenhandeln in demokratischen Gesellschaften. In: Hocke, Peter (Hrsg.); Grunwald, Armin (Hrsg.): *Wohin mit dem radioaktiven Abfall?* Berlin: edition sigma, 2006, S. 155–180
- [Hocke 2013] Hocke, Peter: Nach dem Konsens ist vor dem Konsens. Deutsche Endlagerkonflikte zwischen Gesetzgebung und simulierter Bürgernähe? In: Müller, Monika C. M. (Hrsg.): *Loccumer Protokolle. Endlager-suche - gemeinsam mit den Bürgern! Information - Konsultation - Dialog - Beteiligung* Bd. 2013. Rehburg-Loccum: Evangelische Akademie Loccum, 2013, S. 121–131
- [Hocke 2015a] Hocke, Peter: Erweiterte Öffentlichkeitsbeteiligung bei der nuklearen Entsorgung. Deutschland und Schweiz im Vergleich. In: Bognner, Alexander (Hrsg.); Decker, Michael (Hrsg.); Sotoudeh, Mahshid (Hrsg.): *Responsible Innovation. Neue Impulse für die Technikfolgenabschätzung*. Baden-Baden: edition sigma, 2015, S. 185–196
- [Hocke 2015b] Hocke, Peter: Nuclear Waste Repositories and Ethical Challenges. In: Wyss, Max (Hrsg.); Peppoloni, Silvia (Hrsg.): *Geoethics. Ethical Challenges and Case Studies in Earth Science*. Amsterdam: Elsevier, 2015, S. 359–367
- [Hocke 2016] Hocke, Peter: Technik oder Gesellschaft? Atommüll als sozio-technische Herausforderung begreifen. In: (Brunnengräber, 2016c), S. 77–96

- [Hocke u. Grunwald 2006] Hocke, Peter (Hrsg.); Grunwald, Armin (Hrsg.): *Wohin mit dem radioaktiven Abfall? Perspektiven für eine sozialwissenschaftliche Endlagerforschung*. Berlin: edition sigma, 2006 (Gesellschaft - Technik - Umwelt)
- [Hocke u. Kallenbach-Herbert 2015] Hocke, Peter; Kallenbach-Herbert, Beate: Always the Same Old Story? Nuclear Waste Governance in Germany. In: (Brunnengräber u. a., 2015a), S. 177–201
- [Hocke u. Kuppler 2015] Hocke, Peter; Kuppler, Sophie: Participation under Tricky Conditions. The Swiss Nuclear Waste Strategy Based on the Sectoral Plan. In: (Brunnengräber u. a., 2015a), S. 157–176
- [Hocke u. a. 2018] Hocke, Peter (Hrsg.); Kuppler, Sophie (Hrsg.); Smeddinck, Ulrich (Hrsg.); Hassel, Thomas (Hrsg.): *Technisches Monitoring und Long-term Governance*. Baden-Baden: edition sigma, 2018 – In Vorbereitung
- [Hocke u. Röhlig 2014] Hocke, Peter; Röhlig, Klaus-Jürgen: Challenges of communicating safety case results to different audiences. Paris, 2014, 373–384
- [Hocke u. Smeddinck 2017] Hocke, Peter; Smeddinck, Ulrich: Robust-parlamentarisch oder informell-partizipativ? Die Tücken der Entscheidungsfindung in komplexen Verfahren. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2017), Nr. 2, S. 125–128
- [Honneth 1995] Honneth, Axel (Hrsg.): *Kommunitarismus: eine Debatte über die moralischen Grundlagen moderner Gesellschaften*. 3. Aufl. Frankfurt/M.: Campus, 1995 (Theorie und Gesellschaft 26)
- [Honneth 2016] Honneth, Axel: *Kampf um Anerkennung: zur moralischen Grammatik sozialer Konflikte ; mit einem neuen Nachwort*. 9. Aufl. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 2016 (Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft 1129)
- [Hornig u. Bauer 2016] Hornig, Eike-Christian; Bauer, Simon R.: Infrastrukturproteste und Demokratieunterstützung. In: *Zeitschrift für Politikwissenschaft* 26 (2016), Nr. 2, S. 153–172
- [Häfner 2016a] Häfner, Daniel: Die Politikwissenschaft und Nuclear Waste Governance. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>. In: (Smeddinck u. a., 2016), 9–12

- [Häfner 2016b] Häfner, Daniel: Screening der Akteure im Bereich der Endlagerstandortsuche für radioaktive Reststoffe in der Bundesrepublik Deutschland. Das „Who is who“ eines sich verändernden Konfliktfeldes. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Berlin, 2016 (4) – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Janich u. a. 2012] Janich, Nina (Hrsg.); Nordmann, Alfred (Hrsg.); Schebek, Liselotte (Hrsg.): *Nichtwissenskommunikation in den Wissenschaften. interdisziplinäre Zugänge*. Frankfurt/M.: Lang, 2012 (Wissen - Kompetenz - Text Bd. 1)
- [Jenkins-Smith u. Kunreuther 2001] Jenkins-Smith, Hank; Kunreuther, Howard: Mitigation and Benefits Measures as Policy Tools for Siting Potentially Hazardous Facilities. Determinants of Effectiveness and Appropriateness. In: *Risk Analysis* 21 (2001), April, Nr. 2, S. 371–382
- [Junge 2008] Junge, Torsten: *Gouvernementalität der Wissensgesellschaft: Politik und Subjektivität unter dem Regime des Wissens*. Transcript, 2008
- [Kalmbach 2016] Kalmbach, Karena: Ein Forum zur Entwicklung neuer Lösungsansätze oder zur Austragung alter Konflikte? Die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“. In: Brunnengräber, Achim (Hrsg.): *Problemfälle Endlager*. Baden-Baden: edition sigma in der Nomos Verlagsgesellschaft, 2016, S. 389–408
- [Kalmbach u. Röhlig 2016] Kalmbach, Karena; Röhlig, Klaus-Jürgen: Interdisciplinary Perspectives on Dose Limits in Radioactive Waste Management. A Research Paper Developed within the ENTRIA Project. In: *Journal of Radiological Protection* 36 (2016), Nr. 2, S. 8–22
- [Krohn u. a. 2017] Krohn, Wolfgang; Grunwald, Armin; Ukowitz, Martina: Transdisziplinäre Forschung revisited: Erkenntnisinteresse, Forschungsgegenstände, Wissensform und Methodologie. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2017), Nr. 4, S. 341–347
- [Kunreuther u. Easterling 1996] Kunreuther, Howard; Easterling, Douglas: The Role of Compensation in Siting Hazardous Facilities. In: *Journal of Policy Analysis and Management* 15 (1996), Nr. 4, S. 601–622
- [Kunreuther u. a. 1990] Kunreuther, Howard; Easterling, Douglas; Desvousges, William; Slovic, Paul: Public Attitudes Toward Siting a High-Level Nuclear Waste Repository in Nevada. In: *Risk Analysis* 10 (1990), Nr. 4, S. 469–484

- [Kuppler 2016] Kuppler, Sophie: Modellfall(e) Schweiz. Was aus der Standortsuche gelernt und generalisiert werden kann. In: (Brunnengräber, 2016c), S. 339–358
- [Kuppler 2017] Kuppler, Sophie: *Effekte deliberativer Ereignisse in der Endlagerpolitik. Deutschland und die Schweiz im Vergleich von 2001 bis 2010*. Wiesbaden: Springer VS, 2017
- [Kuppler u. Hocke 2012] Kuppler, Sophie; Hocke, Peter: Monitoring in einem Pilotlager. Kontrollierte Deponierung von Nuklearabfällen im Konzept eines Schweizer Tiefenlagers. In: *TaTuP* 21 (2012), Nr. 3, S. 43–51
- [Kuppler u. Hocke 2015] Kuppler, Sophie; Hocke, Peter: “Enabling” public participation in a social conflict. The role of long-term planning in nuclear waste governance. <http://www.academia.edu/14483549/>. Karlsruhe, 2015 – Interner Bericht
- [Kuppler u. Hocke 2018] Kuppler, Sophie; Hocke, Peter: The role of long-term planning in nuclear waste governance. In: *Journal of Risk Research* (2018) – Im Erscheinen
- [Kuppler u. a. 2018] Kuppler, Sophie; Plischke, Elmar; Pohlers, Julia; Pönitz, Erik: Interdisziplinäre Zusammenarbeit in ENTRIA: Erfahrungen aus fünf Jahren Bearbeitertreffen. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2018 – ENTRIA Arbeitsbericht – Mit Beiträgen von F. Semper, D. Köhnke, M. Riemann, U. Smeddinck, Ch. Tzschentke. In Vorbereitung.
- [Kühl u. a. 2016] Kühl, Yasmine; Wittstock, Felix; Wulf, Nele: Beteiligung lernen. Diskussionsbeitrag anlässlich des „Bürgerdialogs Standortsuche“ der Endlager-Kommission. In: *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis* 25 (2016), Nr. 1, 83–89. <http://www.tatup-journal.de/downloads/2016/tatup161.pdf>
- [Lakatos 1982] Lakatos, Imre: *Die Methodologie der wissenschaftlichen Forschungsprogramme (Philosophische Schriften)*. Braunschweig: Vieweg, 1982
- [Lange u. Schimank 2004] Lange, Stefan; Schimank, Uwe: Governance und gesellschaftliche Integration. In: Lange, Stefan (Hrsg.); Schimank, Uwe (Hrsg.): *Governance und gesellschaftliche Integration*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2004, S. 9–44

- [Lehtonen 2010] Lehtonen, Markku: Deliberative decision-making on radioactive waste management in Finland, France and the UK: influence of mixed forms of deliberation in the macro discursive context. In: *Journal of Integrative Environmental Sciences* 7 (2010), September, Nr. 3, S. 175–196
- [Lynn 2011] Lynn, Laurence E.: The Persistence of Hierarchy. In: *The SAGE Handbook of Governance*. London: SAGE Publications, 2011, S. 218–236
- [Marschall 2008] Marschall, Stefan: Kommunikation und Entscheidungsfindung im Parlament. In: Sarcinelli, Ulrich (Hrsg.); Tenscher, Jens (Hrsg.): *Politikherstellung und Politikdarstellung*. Köln: Herbert von Haalem Verlag, 2008, S. 44–62
- [Mayntz 2009a] Mayntz, Renate: Governance Theory als fortentwickelte Steuerungstheorie? (2005). In: Mayntz, Renate (Hrsg.): *Über Governance. Institutionen und Prozesse politischer Regelung*. Frankfurt/M., New York: Campus, 2009, S. 41–52
- [Mayntz 2009b] Mayntz, Renate: Von politischer Steuerung zu Governance? Überlegungen zur Architektur von Innovationspolitik (2008). In: Mayntz, Renate (Hrsg.): *Über Governance. Institutionen und Prozesse politischer Regelung*. Frankfurt/M., New York: Campus, 2009, S. 105–120
- [Mayntz 2009c] Mayntz, Renate: *Über Governance. Institutionen und Prozesse politischer Regelung*. Frankfurt/M.: Campus, 2009 (Schriften aus dem Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung Köln 62)
- [Mbah 2016] Mbah, Melanie: Bergwerk als technologisches Artefakt. Ein Beitrag zur untertägigen Entsorgung radioaktiver Abfälle aus Perspektive der Technikfolgenabschätzung. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover / Karlsruhe, 2016 (6) – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Mbah 2017] Mbah, Melanie: Partizipation und Deliberation als Schlüsselkonzepte im Konflikt um die Endlagerung radioaktiver Abfälle? Herausforderungen für die repräsentative Demokratie / Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse. Karlsruhe, 2017 (2017) – Interner Bericht
- [Michelsen u. Walter 2013] Michelsen, Danny; Walter, Franz: *Unpolitische Demokratie: zur Krise der Repräsentation*. 1. Aufl. Berlin: Suhrkamp, 2013 (Edition Suhrkamp 2668)

- [OECD Nuclear Energy Agency 2004] OECD Nuclear Energy Agency: *Step-wise approach to decision making for long-term radioactive waste management: Experience, issues and guiding principles*. Issy-les-Moulineaux: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2004
- [NEA 2010] OECD Nuclear Energy Agency: *From Information and Consultation to Citizen Influence and Power: 10-Year Evolution in Public Involvement in Radioactive Waste Management*. 2010
- [Offe 2008] Offe, Claus: Governance – Empty Signifier oder sozialwissenschaftliches Forschungsprogramm? In: Schuppert, Gunnar F. (Hrsg.); Zürn, Michael (Hrsg.): *Governance in einer sich wandelnden Welt* Bd. 41. Wiesbaden: Springer, 2008, S. 61–76
- [Pielke 2007] Pielke, Roger A. Jr: *The Honest Broker. Making Sense of Science in Policy and Politics*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007
- [Pohl u. a. 2017] Pohl, Christian; Krütli, Pius; Stauffacher, Michael: Ten Reflective Steps for Rendering Research Societally Relevant. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2017), Januar, Nr. 1, S. 43–51
- [Radkau u. Hahn 2013] Radkau, Joachim; Hahn, Lothar: *Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft*. München: Oekom, 2013
- [Renn 2013] Renn, Ortwin: Partizipation bei öffentlichen Planungen. Möglichkeiten, Grenzen, Reformbedarf. In: Keil, Silke I. (Hrsg.); Thaidigsmann, S. I. (Hrsg.): *Zivile Bürgergesellschaft und Demokratie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 71–96
- [Richardson 2010] Richardson, Phil J.; Galson Sciences Limited (Hrsg.): *Community Benefits and Geological Disposal: An International Review*. Galson Science Limited, 2010
- [Rittel u. Webber 1973] Rittel, Horst W. J.; Webber, Melvin M.: Dilemmas in a General Theory of Planning. In: *Policy Sciences* 4 (1973), Juni, Nr. 2, S. 155–169
- [Roberts 2000] Roberts, Nancy: Wicked Problems and Network Approaches to Resolution. In: *International Public Management Review* 1 (2000), Nr. 1, S. 1–4

- [Rosa 2016] Rosa, Hartmut: *Resonanz. Eine Soziologie der Weltbeziehung*. 1. Aufl. Berlin: Suhrkamp, 2016
- [Rucht 2008] Rucht, Dieter: Die Anti-Atomkraftbewegung. In: Roth, Roland (Hrsg.); Rucht, Dieter (Hrsg.): *Die sozialen Bewegungen in Deutschland seit 1945. Ein Handbuch*. Frankfurt/M.: Campus, 2008, S. 245–266
- [Röhlig u. Hocke 2016] Röhlig, Klaus-Jürgen; Hocke, Peter: Safety Case, Interdisziplinarität und Transdisziplinarität. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>. In: (Smeddinck u. a., 2016), 77–88
- [Röhlig u. a. 2016] Röhlig, Klaus-Jürgen; Hocke, Peter; Smeddinck, Ulrich; Walther, Clemens; Eckhardt, Anne; Hassel, Thomas; Chaudry, Saleem; Plischke, Elmar: Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen. 2016 – Zwischenbericht des Verbundvorhabens ENTRIA 2013 – 2015: Ergebnisse, Arbeitsstand und Leistungsbilanz
- [Röhlig u. a. 2014] Röhlig, Klaus-Jürgen; Walther, Clemens; Bach, Friedrich-Wilhelm; Brunnengräber, Achim; Budelmann, Harald; Chaudry, Saleem; Eckhardt, Anne; Geckeis, Horst; Grunwald, Armin; Hassel, Thomas; Hocke, Peter; Lux, Karl-Heinz; Mengel, Kurt; Metz, Volker; Ott, Konrad; Plischke, Elmar; Riemann, Moritz; Smeddinck, Ulrich; Schreurs, Miranda A.; Stahlmann, Joachim: Memorandum zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe. https://www.entria.de/fileadmin/entria/Dokumente/ENTRIA_Memorandum_140430.pdf. Hannover, 2014 – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Rückert-John 2013] Rückert-John, Jana (Hrsg.): *Soziale Innovation und Nachhaltigkeit: Perspektiven sozialen Wandels*. Wiesbaden: Springer VS, 2013 (Innovation und Gesellschaft)
- [Smeddinck 2016] Smeddinck, Ulrich: Synergien oder Reibungsverluste? Wer koordiniert die Institutionen/Aktivitäten und führt sie zusammen? In: *Loccumer Protokolle. Endlagersuche. Endlager-Kommission und Öffentlichkeit(en): Fragen nach Zusammenarbeit und Fortschritten im Prozess zur Halbzeit der Kommission* Bd. 2014. Rehburg-Loccum: Evangelische Akademie Loccum, 2016, S. 69–80
- [Smeddinck 2017a] Smeddinck, Ulrich: Die Fortentwicklung des StandAG - Gesetzgebungsgeschichte, Beispiele, Reflektionen. In: *EurUP-Zeitschrift für Europäisches Umwelt- und Planungsrecht* 2017 (2017), Nr. 3, S. 195–295

- [Smeddinck 2017b] Smeddinck, Ulrich: Kommentierung zu §§ 1, 2, 5, 6, 8, 9, 10. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2017
- [Smeddinck u. a. 2016] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.); Kuppler, Sophie (Hrsg.); Chaudry, Saleem (Hrsg.): *Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016 <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>
- [Stehr 2001] Stehr, Nico: *The Fragility of Modern Societies. Knowledge and Risk in the Information Age*. London, Thousand Oaks, CA: SAGE, 2001
- [Stehr 2003] Stehr, Nico: *Wissenspolitik. Die Überwachung des Wissens*. 1. Aufl. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 2003 (Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft 1615)
- [Steffler u. a. 2011] Steffler, Christian; Gethmann, Carl F.; Kamp, Georg; Kröger, Wolfgang; Rehbinder, Eckard; Renn, Ortwin; Röhl, Klaus-Jürgen: *Radioactive Waste. Technical and Normative Aspects of its Disposal*. Berlin: Springer, 2011 (Ethics of science and technology assessment 38)
- [SKB 2017] Svensk Kärnbränslehantering AB: *Our generation must take care of the Swedish nuclear waste*. <http://www.skb.com/about-skb/our-task/>. Abruf: 22.02.2017
- [Tatham u. Houghton 2011] Tatham, Peter; Houghton, Luke: The Wicked Problem of Humanitarian Logistics and Disaster Relief Aid. In: *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management* 1 (2011), Nr. 1, S. 15–31
- [Torfing 2006] Torfing, Jacob: Governance Networks and their Democratic Anchorage. In: *New Spaces of European Governance*. Wien: Faculty of Social Sciences, University of Vienna, 2006, S. 109–128
- [Verweij u. Thompson 2006] Verweij, Marco; Thompson, Michael: *Clumsy Solutions for a Complex World. Governance, Politics and Plural Perceptions*. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2006
- [Wagner u. Grunwald 2015] Wagner, Felix; Grunwald, Armin: Reallabor als Forschungs- und Transformationsinstrument. Die Quadratur des hermeneutischen Zirkels. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 24 (2015), Januar, Nr. 1, S. 26–31

- [Warren u. Mansbridge 2016] Warren, Mark E.; Mansbridge, Jane: *Deliberative Negotiation*. In: Mansbridge, Jane (Hrsg.); Martin, Cathie J. (Hrsg.): *Political Negotiation. A Handbook*. Washington, D.C.: Brookings Institution Press, 2016, S. 141–196
- [Wassermann 2015] Wassermann, Sandra: *Expertendilemma*. In: *Methoden der Experten- und Stakeholdereinbindung in der sozialwissenschaftlichen Forschung*. Wiesbaden: Springer VS, 2015, S. 15–32
- [Wehling 2006] Wehling, Peter: *Im Schatten des Wissens? Perspektiven der Soziologie des Nichtwissens*. Konstanz: UVK Verlagsgesellschaft, 2006 (Theorie und Methode)
- [Weyer 2008] Weyer, Johannes: *Techniksoziologie. Genese, Gestaltung und Steuerung sozio-technischer Systeme*. Weinheim: Juventa Verlag, 2008 (Grundlagentexte Soziologie)
- [Willmann u. Schmidt 2016] Willmann, Sebastian; Schmidt, Philipp: *Das Konzept der Freiwilligkeit bei der Entscheidung über einen Endlagerstandort – eine philosophische und rechtswissenschaftliche Betrachtung*. In: Smeddinck, Ulrich (Hrsg.); Kuppler, Sophie (Hrsg.); Chaudry, Saleem (Hrsg.): *Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 89–104
- [Wulf 2015] Wulf, Nele: *Die schwedische Endlagersuche. Zur Rolle von Expertise und der Kommunikation von Wissen*. Karlsruhe, 2015 – Interner Bericht

5.3 Transversalprojekt 3 - Ethisch-moralische Begründung, rechtliche Voraussetzungen und Implikationen

Das Transversalprojekt 3 diente der Analyse der normativen Aspekte der Entsorgungsoptionen und des gesellschaftlichen Prozesses. Es ist unbestreitbar, dass alle wesentlichen Entscheidungen, die es im Verlauf einer Einlagerungsstrategie zu treffen gilt, nicht nur auf wissenschaftlichen Wissen, sondern auf Werturteilen und Normierungen beruhen. Bei einer Veränderung der normativen Prämissen können sich Entscheidungsgrundlagen und damit Entscheidungen wesentlich verändern. Aufgabe der philosophischen Ethik in ENTRIA war es, den Sinn für die normative Dimension zu schärfen, die Aufgabe des Rechts bestand in der Analyse der Regulierungen in den Rechtsgrundlagen. Normativität gliedert sich in Recht und Moral, die jeweils rechtswissenschaftlich, rechtsphilosophisch und ethisch reflektiert werden können. Die Ziele und Grundsätze sowohl von Verfassungsrecht als auch von einzelgesetzlichen Rechtsmaterien (wie dem Atomrecht) sind auch für Moral und Ethik stark relevant. Recht und Moral unterscheiden sich häufig weniger inhaltlich als durch die Art der Verbindlichkeit, die im Recht ungleich höher ist als in Moral und ihrer Reflexionsform, der Ethik. Daher ist es eine Aufgabe von Politik, begründete moralische Gehalte in die Form des Rechts zu überführen und zu institutionalisieren. Bezogen auf die beiden Metakriterien Sicherheit und Gerechtigkeit widmete sich das Transversalprojekt vor allem der differenzierten Analyse von Gerechtigkeit und Freiwilligkeit (siehe Abschnitt 3.8).

5.3.1 AP „Sicherheit, Gerechtigkeit, Diskurs: Kriterien, Verfahren und Gründe für die Endlagersuche“ (CAU Kiel, Lehrstuhl für Philosophie und Ethik der Umwelt)

Das Vorhaben am Lehrstuhl für Philosophie und Ethik der Umwelt der CAU Kiel wurde in konzeptioneller Zusammenarbeit mit dem Vorhaben der Rechtswissenschaft in Braunschweig bearbeitet. Gemeinsames zentrales Anliegen und damit Ziel war es, die wissenschaftliche, politische und gesellschaftliche Debatte um die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle hinsichtlich ihrer normativen Voraussetzungen, Implikationen und Fragestellungen kritisch zu reflektieren.

Die Aufgabe der Philosophie besteht vor allem in der begrifflich-klärenden und reflexiv-begründeten Arbeit, das heißt in Analyse, Spezifi-

zierung und Operationalisierung einschlägiger normativer Begriffe sowie in der Rechtfertigung und Kritik normativer Geltungsansprüche. Beispiele für Geltungsansprüche wären etwa: „Zukünftige Generationen sollen größtmögliche Handlungsfreiheit im Umgang mit radioaktiven Reststoffen haben“, „Die bestmögliche Langfristlösung besteht (nicht) in einem wartungsfreien Tiefenlager“, „Wir sollten langfristige Oberflächenlager (nicht) ernsthaft in Erwägung ziehen“, „Wir sollten (keine) Transmutationsforschung betreiben“, „Wir sollten (k)ein Erkundungsbergwerk in Kristallingestein errichten“, „Gorleben sollte aus dem zweiten Suchlauf (nicht) von vornherein ausscheiden“ usw. Man sieht an den immer möglichen Negationen, dass auch gegensätzliche Geltungsansprüche nicht von vornherein unvernünftig erscheinen. Vernunft bemisst sich an Gründen. Geltungsansprüche sollen mit Gründen eingelöst werden. Formal ist es möglich, einen Geltungsanspruch als Konklusion eines praktischen Schlusses zu setzen und zu fragen, unter welchen (sinnvollen) Prämissen sich diese Konklusion ergibt. Ein praktischer Schluss oder Syllogismus beschreibt in der Argumentations- und Handlungstheorie ein Modell zur Beschreibung menschlichen Handelns auf der Grundlage von Wertannahmen und der Handlungen die sich aus ihnen ableiten lassen. Die Methode der Ethik ist somit die einer kritischen Präsuppositionsanalyse, also die Analyse von Werturteilen und Annahmen, und einer logischen Rekonstruktion normativer Geltungsansprüche. Dies erlaubt es allen ENTRIA-Akteuren, sich mit guten Gründen an eigenen und fremden Gründen zu orientieren.

Die Ergebnisse der Ethik lassen sich in implizite und explizite Ergebnisse unterteilen. Explizit ist, was sich anhand von Publikationen und Tagungsbeiträgen dokumentieren lässt, während ein gewichtiger Teil der ethischen Ergebnisse als implizite Impulse eher auf der Ebene des interdisziplinären Forschungsprozesses verstanden werden können. Ethische Reflexion fließt im Erfolgsfalle in einen Forschungsverbund kontinuierlich ein. Diese Impulse betreffen verschiedene Punkte, die für das trans- und interdisziplinäre Gespräch innerhalb der Transversal- und auch der Vertikalprojekte von Bedeutung waren. Dies betraf in ENTRIA die Entwicklung von Grundlagen für den Vergleich einzelner Aspekte der drei ENTRIA-Optionen. Die Unterscheidungen, Themensetzungen und Reflexionen des Forschungsverbundes sind Ergebnisse einer geistigen Spontaneität, an der viele ENTRIA-Forscher in unterschiedlichen Konstellationen beteiligt waren. So hat das ethische Teilprojekt zur Schärfung des Forschungsgegenstandes beigetragen, indem normative und wissenschaftliche Begriffe kritisiert und präzisiert wurden, die dann in andere Teilprojekten eingeflossen sind. Diese reflexive Arbeit erstreckte sich von der

Identifizierung der Metakriterien Sicherheit und Gerechtigkeit, über ihre Differenzierung in Konzepten von Sicherheit, Risiko und Gefahr⁶³, Reversibilität, Partizipation, Strategieentwicklung, sowie die Entwicklung von wissenschaftlichen Formaten (Plädoyers & Gegenreden) hin zur wissenschaftstheoretischen Fundierung von Bewertungsgrundlagen, Kriterien und Indikatoren.

Das Teilprojekt bediente sich der Diskursethik, wie sie von Karl-Otto Apel und Jürgen Habermas und ihren Schülerinnen und Schülern seit den 1980er Jahren entwickelt wurde, als einer Ausgangstheorie für die Bildung normativer Urteile. Grob gesagt, prüft die Diskursethik die Bedingungen der Möglichkeit einer (möglichst) rationalen Rechtfertigung von normativen Geltungsansprüchen. Aufgrund der Frage nach den Bedingungen der Möglichkeit gelingender Redepraxis wird sie als „transzendental-pragmatisch“ bezeichnet. Es handelt sich um eine prozedurale Rahmentheorie, die substantielle Beiträge zu thematisch bestimmten Diskursen sowie deren kritische Prüfung ermöglicht⁶⁴.

Die Diskursethik dient wesentlich als Gerüst für die Operationalisierung normativer Begriffe hinsichtlich ihrer Bedeutung für Gerechtigkeit in den Schritten und Verfahren des Entsorgungsprozesses. Eine begriffliche Klärung ist notwendig, wenngleich nicht hinreichend für eine diskursive Beurteilungspraxis.

Die Diskursethik ist als Theorie zudem eng verbunden mit den Mechanismen und Dynamiken gesellschaftlicher Selbstverständigungs- und demokratischer Entscheidungsfindungsprozesse. Sie wurde und wird auf dem Gebiet der politischen Philosophie zu einer Konzeption deliberativer Demokratie spezifiziert, die auf den Prinzipien der Inklusion bzw. Partizipation und der argumentativen Deliberation beruht (Habermas, 1992, Kap. VII u. VIII). Die Anwendung dieser Konzeption auf das Sachproblem der Einlagerung hoch radioaktiver Reststoffe stellt aus diskursethischer Sicht ein Novum dar, da es hierbei nicht um einen Diskurs über allgemeine Rechtsnormen geht, sondern um die streitige Allokation eines unerwünschten Bestandes bzw. eines negativen Gutes im Rahmen eines komplexen Verfahrens, das fair zu sein beanspruchen können muss (siehe Kapitel 3.8).

Zugleich bietet die Diskursethik den Rahmen für die demokratiethoretische Analyse in der Frage, wie Gesellschaften in Anbetracht größerer Herausforderungen („wicked problems“) ihre diesbezügliche Verständigungs- und Entscheidungsprozesse organisieren. Im Hintergrund steht die Frage, ob eine parlamentarische und rechtsstaatlich verfasste Demo-

⁶³In Anschluss an Luhmann (1991).

⁶⁴Siehe hierzu Ott (2017)

kratie von derartigen Problemen (nicht) überfordert wird. Droht hier aus prinzipiellen Gründen „Staatsversagen“? Kann ein Höchstmaß an Partizipation diese Gefahr reduzieren?

Der Forderung nach mehr Partizipation in gelungener Entsorgungsgovernance stellte sich das Arbeitspaket mit zwei zentralen Anwendungsbeispielen diskursiver Urteilsbildung: einem Bürgerforum unter zufällig ausgewählten Bürgerinnen und Bürgern und einer Delphi-Studie unter Expertinnen und Experten. Diese beiden partizipativen Urteilsbildungskonzepte und –verfahren verweisen insofern zugleich auf die Herausforderungen und Chancen transdisziplinären Forschens, als sie den Diskursraum um außerakademische Argumentationen und Einschätzungen erweiterten und so einer erweiterten Wissensgenese dienen.

Nicht zuletzt diene die philosophische Reflexion dem Nachdenken über Technologiepfade, technische Leitbilder (wie etwa dem Leitbild des „Atomzeitalters“), Kriterien der Technikbeurteilung, der ethischen Betrachtung technischer Risiken, Konzepten der Technikfolgenabschätzung und der wissenschaftstheoretischen Betrachtung interdisziplinären Arbeitens.

Forschungsstand

Obwohl es seit den 1970er Jahren eine Fülle von Abhandlungen über die ethischen Probleme der zivilen Nutzung von Kernenergie gibt, sind ethische und fachübergreifende Auseinandersetzungen mit spezifischen Entsorgungslösungen selten. Dies spiegelt sich insbesondere in Deutschland an der technik- und naturwissenschaftlichen Schwerpunktsetzung der Entsorgungsforschung zum Zeitpunkt des Projektbeginns. Die Dringlichkeit der Aufarbeitung von ethischen Problemstellungen zeigte sich an gesellschaftlichen Konfliktlagen und parlamentarischen Entscheidungsprozessen einschließlich neuartiger Institutionen (Kommission, Begleitgremium).

Bei der Aufarbeitung der ethischen Fachliteratur stellte sich heraus, dass überwiegend Fragen der generellen Vertretbarkeit der Kernenergie behandelt wurden. Die spezifische, interdisziplinäre Analyse von Entsorgungsoptionen wurde hingegen kaum näher behandelt. Eine Ausnahme bildet Streffer u. a. (2011). Dieser Band wurde nach genauer Lektüre als Ausgangspunkt weiterführender Reflexionen genommen ⁶⁵.

⁶⁵Weitere Ausnahmen bilden Buschka (2009) und Shrader-Frechette (1993).

Problemerschließung

Am Beginn der Arbeiten standen Begriffsanalyse, Bestimmung des Forschungsgegenstandes und die Einbettung in philosophische Rahmen-theorien, die sich in zwei frühen Publikationen zeigte (Ott, 2014b,a). Der Beitrag für die Festschrift zu Ehren des Technikphilosophen Günter Ropohl dient der grundlegenden Selbstverständigung über die durch den Ausstieg aus der zivilen Nutzung der Kernenergie neu entstandene Problemlage. Letztlich geht es um die Frage, wie eine Gesellschaft, die sich nach langwierigen Konflikten aus einer bestimmten Technologielinie zurückzieht, mit den unliebsamen stofflichen Resultaten dieser Technik umgehen kann und sollte. Der Aufsatz spricht wesentliche Punkte an, die in späteren Publikationen zu Zukunftsverantwortung, Oberflächenlage-rung und Freiwilligkeit vertieft wurden.

Der Aufsatz über „deliberative Zwischenreiche“ verfeinert die von Jürgen Habermas in „Faktizität und Geltung“ vorgenommene Analyse des Geflechts aus Institutionen, Ämtern, Gremien, Verbänden, Büros usw., das sich zwischen dem Kern des politischen Systems und der Zivilgesell-schaft herausgebildet hat. Dieser Aufsatz kann auch als eine Verortung von ENTRIA gelesen werden. Entscheidend ist der Nachweis, dass zwischen dem professionalisierten Kern des politischen Systems einerseits (Parlament, Regierung, Ministerien, Parteizentralen) und dem politisch aktiven Teil der Zivilgesellschaft andererseits, die sich politisch selbst organisiert (etwa in Bürgerinitiativen), ein Geflecht aus besagten Organisa-tionen besteht, innerhalb dessen Aussichten auf wirkliche Argumentatio-nen bestehen, die zur Entscheidungsgrundlage werden könnten, obschon politischer Opportunismus einerseits, fundamentale Opposition anderer-seits niemals ausgeschlossen werden kann. Man kann sagen, dass die Ana-lysen des deliberativen Zwischenreiches die System- und die Demokratietheorie zusammenführen möchten.

Die sozialtheoretische Aufarbeitung des „wicked problems“ Entsorgung radioaktiver Reststoffe wurde durch den sich während der Projekt-laufzeit verändernden institutionellen Rahmen flankiert. Die Bildung neuer Institutionen wie des Bundesamts für kerntechnische Entsorgungs-sicherheit, der Bundesgesellschaft für Endlagerung und des Nationalen Begleitgremiums in Kombination mit der Veränderung der Forschungs-landschaft kann anhand des Begriffs des deliberativen Zwischenreiches als Renovierung und zivilgesellschaftliche Öffnung demokratischer Ver-fahren zugunsten einer Problemlösung verstanden werden. Diese Öff-nung geht bis hin zu Konzepten einer „lernenden“ Verwaltung.

Weitere philosophische Forschungsfelder für die Problemerschließung boten sich in der Technikphilosophie und der Risikoethik. Zur Technik-

philosophie bot der Lehrstuhl für Philosophie und Ethik der Umwelt im Sommer 2014 einen Workshop für ENTRIA-Kooperationspartner an, um in die verschiedenen Möglichkeiten der reflexiven Technikbetrachtung einzuführen. Mit Bezug zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe wurden hier primär die Wechselwirkungen zwischen Demokratie und Technik sowie Aspekte und Methoden der normativen Technikfolgenabschätzung beleuchtet.

Ferner wurde im Ausgang von der Grundunterscheidung in Risiko und Gefahr durch Luhmann, die soziale Positionen markiert (Entscheider und Betroffene), Kriterien in Erwägung gezogen, die für Seiten der Unterscheidung annehmbar sein könnten. Ein Kandidat hierfür ist das sog. Minimax-Kriterium („Minimieren den maximal möglichen Schaden“). Allerdings erwies es sich im Diskurs, dass dieses Kriterium zur Konsequenz haben könnte, hoch radioaktive Reststoffe dispers zu verteilen. Nur unter der Voraussetzung einer konzentrierten Einlagerung und der Ablehnung des „dilute and disperse“-Paradigmas erweist sich das Minimax-Kriterium als präsumtiv einschlägig. Aus Sicht der Ethik bleibt es natürlich eine offene Frage, ob Betroffene sich mit diesem Kriterium tatsächlich einverstanden erklären können. Dies lässt sich nicht durch ethische Reflexion, sondern nur in realen gesellschaftlichen Diskursen ermitteln. Daraus erhellt sich, dass ethische Reflexion aus prinzipiellen Gründen reale Diskurse nicht simulieren kann.

Bürgerforum

Aufgrund der Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes wurde die Entscheidung getroffen, das zum Projektende geplante Bürgerforum vorzuziehen. Grund hierfür war die prinzipielle Möglichkeit, das Bürgerforum und die Kommissionsarbeit kommunikativ miteinander zu verbinden. Die im StandAG geschaffene und demokratietheoretisch überaus interessante Institution der Kommission und die Urteilsbildung innerhalb eines Verfahrens der Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern erscheinen im Licht der Konzeption deliberativer Zwischenreiche als parallele deliberative „Knotenpunkte“ (Selbstbindung des Parlaments – aus rechtswissenschaftlicher Sicht: Smeddinck u. Willmann (2014)). Durch den günstigen Umstand, dass sich der Vorsitzende der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Michael Müller, stark für das Bürgerforum interessierte und das Gutachten persönlich entgegennahm, gelang diese kommunikative Verbindung mit der Kommissionsarbeit.

Die Planung des Forums begann somit im Frühjahr 2014 für die Durchführung im Frühjahr 2015. Neben der strukturellen Organisation(Wahl

des Tagungsortes, Auswahl der Teilnehmer, Form und Partner der Moderation) floss die meiste Arbeit in die inhaltliche Konzeption. Theoretisch fundiert wurde das Bürgerforum als Methode an seiner historischen Entwicklung, von Zukunftswerkstätten (R. Jungk), Planungszellen (P. Dienel), Partizipativer Technikfolgenabschätzung (O. Renn), citizen juries (NL, DK) und Publi-Foren (CH) zum Bürgerforum (siehe v. a. Dienel (1978); Ott (2000); Skorupinski u. Ott (2000). Zugleich konnte auf Erfahrungen von Konrad Ott in der Durchführung von Bürgerforen zurückgegriffen werden. Ferner wurde in zwei Workshops mit Studierenden das Format in verkürzter Form als Planspiel geübt (Papenburg, Cottbus). Zur Vorbereitung des Forums wurden Mitarbeiter des Lehrstuhls in Kleingruppenmoderation geschult.

Normativ betrachtet folgt das Format dem diskursiven Ideal einer „idealen Sprechsituation“ (Habermas, 1981), in welcher alle Gründe aller Diskursteilnehmer zunächst gleichwertig angehört werden und in der Diskussion nur der zwanglose Zwang des besseren Arguments vorherrscht. Die Besetzung mit Laien und der bewusste Ausschluss von Stakeholdern im Teilnehmerkreis wiederum gründen auf der Annahme, dass der Gemein-sinn (sensus communis, Kant (1968) Kant 1781/1968) einen regulativen Charakter bei der Bildung von allgemeinen Urteilen hat. Der Teilnehmerkreis ist durch die geringe Anzahl und das Zufallsprinzip nicht repräsentativ.

Da sich von Laien keine fundierte Fachkenntnis erwarten lässt, folgte das Bürgerforum in seiner Anlage über drei Wochenenden auch einem didaktischen, dreischrittigen Aufbau: Erkennen, Reflektieren, Gestalten. Fachlicher Input kam überwiegend von ENTRIA-Nachwuchswissenschaftlern, die Wahl der Moderation fiel auf Mitarbeiter der IFOK GmbH.

Ablauf: Es wurden 25 Teilnehmer aus dem Bundesgebiet per Telefonakquise durch die uzbonn GmbH zufällig ausgewählt. Davon sind 22 zum ersten Wochenende erschienen und 17 haben schließlich das Gutachten verfasst.

- 1. Wochenende 30.01-01.02.2015 “Erkennen”: Kennenlernen der Teilnehmer, Einführung in den Forschungsgegenstand von ENTRIA durch Referate von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Ziel: Die Teilnehmer setzen sich in Plenums- und Gruppendiskussion Schwerpunkte für das weitere Forum und erhalten die Möglichkeit, noch zusätzliche Referenten einzuladen. (\Rightarrow 1. Prozess der Standortauswahl; 2. Rückholbarkeit; 3. Denken in Alternativen).
- 2. Wochenende 20.-22.02. 2015 “Reflektieren”: Rekapitulation des 1. Wochenendes und der Schwerpunkte. Austausch mit Michael Müller. Gruppenarbeit an den Schwerpunkten - Einteilung in Thementische.

Austausch mit Corinna Klein (BfS). Ziel: Die Teilnehmer erarbeiten und verabschieden eine Gliederung für das Bürgergutachten

- 3. Wochenende 13.-15.03.2015 “Gestalten”: Die Teilnehmer erarbeiten im Plenum und in Kleingruppen den Text des Bürgergutachtens. Das Bürgergutachten wurde am 15. März 2015 an den Vorsitzenden der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Michael Müller sowie an ENTRIA zur Veröffentlichung übergeben und so in die politische und wissenschaftliche Debatte eingespeist. Es ist auf der Seite der Kommission und auf <http://www.entria.de/> online publiziert.

Zentrale Ergebnisse des Bürgerforums (Executive Summary)

1. Sicherheit hat oberste Priorität: Bei der Suche nach einer Entsorgungsoption für hoch radioaktiven Müll hat die Sicherheit von Mensch und Natur oberste Priorität, sowohl für heute als auch in gleichem Maße für alle zukünftigen Generationen.
2. Keine Zeit vergeuden: Unsere Generation trägt die Verantwortung für die sichere Lagerung unserer atomaren Abfälle. Keinesfalls dürfen weitere 50 Jahre mit ergebnislosen Diskussionen vergeudet werden. Eine Lösung muss unter dem Primat der Sicherheit schnellstmöglich gefunden werden. Auch Zwischenlösungen müssen deutlich sicherer gestaltet werden.
3. Gesamtgesellschaftlicher Konsens zum Verfahren: Das Verfahren zur Bestimmung der endgültigen Entsorgungsoption muss auf einem gesamtgesellschaftlichen Konsens basieren. Nur ein bestmöglich akzeptiertes Verfahren schafft durch die Gesellschaft langfristig akzeptierte Ergebnisse. Dazu bedarf es in jedem Fall einer umfassenden Bürgerbeteiligung.
4. Es braucht einen Volksentscheid: Das Verfahren der Suche und die im Verfahren handelnden Institutionen müssen durch einen Volksentscheid legitimiert werden. Dies ist eine Möglichkeit, dem bestehenden Misstrauen entgegenzuwirken, öffentliche Aufmerksamkeit für das Verfahren zu gewinnen und schließlich die Akzeptanz des Suchverfahrens zu sichern.
5. Alternative Optionen erforschen: Es ist erforderlich, kontinuierlich nach alternativen Optionen der Entsorgung zu forschen. Dabei darf es keine Denkverbote geben, es muss ergebnis- und themenoffen vorgegangen werden. Auch die deutsche Forschung sollte

sich aus diesem Grund stärker für eine internationale Forschungszusammenarbeit einsetzen. Gleichzeitig muss an der konkreten Umsetzung bisher zur Verfügung stehender Lagerungsoptionen gearbeitet werden.

6. Keine Einigung zur Rückholbarkeit: die Teilnehmenden des Bürgerforums konnten sich trotz intensiver Diskussionen in der Frage der Rückholbarkeit im Falle einer geologischen Tiefenlagerung nicht auf eine gemeinsame Haltung einigen. Diese Tatsache verdeutlicht, dass die Endlager-Kommission und alle weiteren mit der Endlagersuche befassten Gremien ein besonderes Augenmerk auf die Vermittlung und Erörterung von Entscheidungen in dieser Frage legen müssen.

Die Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse des Bürgergutachtens findet sich in (Allenfort u. a., 2015).

Auf politischer Seite folgte dem Bürgerforum eine Einladung von Teilnehmern zur Auftaktveranstaltung zur Bürgerbeteiligung der Kommission in der Jerusalemkirche Berlin am 20. Juni 2015, zu der das Gutachten auch als Drucksache an alle Teilnehmenden verteilt wurde. Zudem wurden drei Teilnehmende zur Sitzung der Arbeitsgruppe 1 der Kommission am 16. Oktober 2015 in den Deutschen Bundestag eingeladen, um dort von ihren Erfahrungen zu berichten und ihr Gutachten noch einmal vorzustellen. Darin liegt ein großer Erfolg des ENTRIA-Bürgerforums, da den Teilnehmern die Möglichkeit gegeben wurde, sich direkt an einer gesellschaftspolitischen Debatte zu beteiligen. Es ist unseres Wissens selten, dass ein Bürgerforum in einen laufenden politischen Prozess integriert wurde. Als problematisch erwies sich allerdings die Festlegung des Bürgergutachtens auf einen Volksentscheid, da diese Lösung als rechtlich und politisch ausgeschlossen gilt. Die wissenschaftliche Auswertung und Einbettung erfolgte in zwei Publikationen: Bimesdörfer u. a. (2016) und Ott u. a. (2018).

Als zentrales Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Teilnehmenden des Bürgerforums einen stärkeren Fokus auf die Gestaltung von Entscheidungsprozessen legten, als auf Details der technischen Umsetzung. Dies verortet die Ergebnisse stärker im Metakriterium der Gerechtigkeit, als in dem der Sicherheit. Ein Höchstmaß an Sicherheit wurde von den Teilnehmenden als absoluter Wert gesetzt. Hier zeigt sich ein prinzipieller Konsens: Alle Gerechtigkeitserwägungen prozeduraler, distributiver, kompensatorischer Art stehen unter der Voraussetzung des Prinzips größtmöglicher Sicherheit.

Die Bürgerinnen und Bürger sprechen sich in ihrem Bürgergutachten deutlich für ein Tiefenlager und eine zügige Suche nach einem solchen Lagertyp aus. Jedoch wurde diese Einsicht nicht als zentrales Ergebnis im Gutachten ausgewiesen.

Bemerkenswert war der während des Bürgerforums spontan entstandene Gedanke, die drei ENTRIA-Optionen als Komponenten einer diachronen Strategie zu interpretieren, auch wenn dabei vernachlässigt wird, dass Endlager ohne bzw. mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit von Beginn an unterschiedliche technische Systeme sind. So regte ein besonders engagierter Teilnehmer des Bürgerforums an, die drei ENTRIA-Lagertypen nicht im Sinne einer Ordnung $A \cup B \cup C$ zu verstehen, die dann im Lichte von Kriterien von Akzeptabilität diskursrational in eine Vorzugsordnung $A > B > C$ (oder anders) zu überführen wäre, sondern als eine mögliche Abfolge in der Zeit zu verstehen ($\text{Status Quo} \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C$). Die Fragen nach Vorzugswürdigkeit und Akzeptabilität in den Dimensionen Gerechtigkeit und Sicherheit blieben auch dann wesentlich, würden aber stärker temporalisiert. Die Oberflächenlagerung und Rückholbarkeit wären dann mögliche Module in einer übergreifenden, zeitlich gestreckten Entsorgungsstrategie. Interessant hierbei ist, dass eine spontane Laienintuition und das Ergebnis der Kommissionsarbeit in die gleiche Richtung weisen. Auch hier bildet sich offenbar ein diesbezüglicher Grundkonsens, der letztlich auf die Errichtung eines verschließbaren oder zu verschließenden Tiefenlagers hinausläuft.

Als Methode ist ein einmaliges Bürgerforum nicht geeignet, repräsentative Ergebnisse zu erzielen oder breitere Teile der Öffentlichkeit an einem wissenschaftlichen und politischen Prozess zu beteiligen. Es zeigt auch auf, dass inhaltlich detaillierte Beteiligungsformate für alle Beteiligten sehr aufwendig sind. Allerdings eignet sich die Methode zur Evaluation von Chancen und Grenzen einer unvoreingenommenen Laienpartizipation und der Überprüfung wissenschaftlicher wie politischer Debattenbausteine hinsichtlich ihrer Plausibilität und Nachvollziehbarkeit Bimesdörfer u. a. (2016).

Delphi-Studie

Das Delphi-Verfahren geht auf die Evaluation von Prognosen der Expertinnen und Experten zurück, welche in den 1950er und 1960er Jahren von der RAND Corporation für militärische Zwecke genutzt wurden¹. Erst später, in Deutschland vor allem in den 1990er Jahren entwickelte sich ein verstärktes Interesse an Delphi-Verfahren (Häder, 2014). Die Methode wird vor allem im Bereich der Zukunftsforschung (z.B. Marktanalysen, so-

zialwissenschaftliche Erhebungen) angewendet (Cuhls, 2009; Steinmüller, 1997).

Allerdings gibt es mittlerweile ganz unterschiedliche Typen von Delphi-Befragungen. Eine Unterscheidung zwischen quantitativen und qualitativen Verfahren reicht hier allerdings nicht aus. Vielmehr gibt es mittlerweile dialog- oder konsensorientierte Verfahren, Delphi-Studien zur Ideenaggregation oder zur Ermittlung von Sachverhalten (vgl. Häder (2014)). Auch unterscheiden sich die Befragungen hinsichtlich des Verfahrensablaufs (zum Beispiel die Anzahl der Fragerunden) und der Art und Weise der Befragung (zum Beispiel Online-Fragebögen oder Gruppenbefragungen)⁶⁶. Auch die thematischen Ausrichtungen der Studien sind unterschiedlich. Zwar gibt es vor allem im Bereich von Technikfolgenabschätzung und Technikpolitik einen vermehrten Einsatz von Delphi-Studien, jedoch werden diese auch zum Beispiel im medizinischen Bereich verwendet (Steinmüller, 1997).

Das generelle Ablaufschema eines Delphi-Verfahrens wird durch Abbildung 5.1 verdeutlicht. Zentrales Element von Delphi-Befragungen sind mehrere Befragungsrunden, wobei die Folgerunde(n) die Antworten aus der ersten Runde explizit einbeziehen. Abbildung 5.1 veranschaulicht diese Vorgehensweise: Im Zentrum stehen die Fragen des Monitoringteams. Diese werden den Expertinnen und Experten zur Beantwortung präsentiert. Die Antworten, die Zwischenresultate, werden dann in der zweiten Fragewelle wiederum zur Kommentierung freigegeben. Es gibt Delphi-Verfahren mit mehr als zwei Fragerunden. Jedoch hat sich empirisch herausgestellt, dass weitere Fragerunden nicht nur sehr aufwendig sind, sondern auch kaum zur Verbesserung des Ergebnisses beitragen (Steinmüller, 1997).

Die Delphi-Studie des Teilprojektes diente insbesondere der Identifikation möglichst vieler unterschiedlicher Ansichten und Begründungsstrategien in Bezug auf zentrale Problematiken der Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe. Damit wurde versucht, der Komplexität des Diskurses und der Sachlage Rechnung zu tragen. Im Gegensatz zur Konsensorientierung im Bürgerforum wurde bei der Studie kein Konsens unter den Teilnehmenden angestrebt. Positionen aus der ersten Fragerunde, welche sich inhaltlich widersprechen, wurden jedoch bewusst als Frage oder Aussage, zu der sich die Teilnehmenden argumentativ verhalten sollten, in die zweite Befragungsrunde eingebaut. Damit wurde der Versuch unternommen, die unterschiedlichen Sichtweisen zu kommunizieren und die

⁶⁶In der deutschen Forschungslandschaft ist hier insbesondere der Sozialwissenschaftler Ortwin Renn zu nennen, der seit Jahren zur Methode des Gruppendelphis forscht (Schulz u. Renn, 2009).

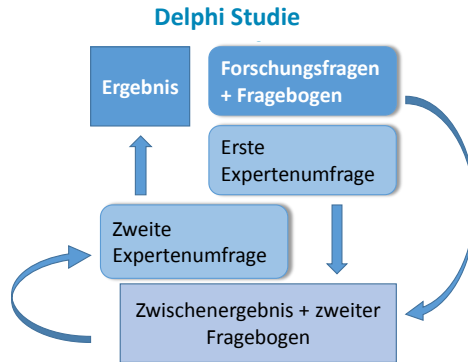


Abbildung 5.1: Generelles Ablaufschema eines Delphi-Verfahrens.

Expertinnen und Experten damit in gewisser Weise in die Lage zu bringen, sich mit anderen Positionen auseinander setzen zu müssen. Hauptintention dieser Vorgehensweise war es, wie beim Bürgerforum, einen gewissen Zwang zur Reflexion anderer Standpunkte und Argumente zu erzeugen und vor diesem Hintergrund auch eine intensivere Auseinandersetzung mit der eigenen Argumentationsstrategie und Positionierung zu ermöglichen.

Für die Teilnahme an der Delphi-Studie in ENTRIA wurden Vertreterinnen und Vertreter aus unterschiedlichen Akteursgruppen angesprochen, ganz im Sinne des eigenen Forschungsanliegens, möglichst viele heterogene Sichtweisen erkennbar und diskutierbar werden zu lassen. Da dies das zentrale Anliegen unserer Studie war, unterscheidet sich das Konzept von klassischen Delphi-Formaten. Vielmehr kann die Delphi-Befragung in ENTRIA im Sinne eines Politik-Delphis verstanden werden (vgl. Turoff (2002)).

Auswahl der Teilnehmenden

Die Auswahl der Teilnehmenden erfolgte per Telefon und / oder e-Mail. Zu Beginn der Auswahl wurde eine Übersicht erstellt mit den Namen potentieller Teilnehmender, welche unter die jeweilige Akteursgruppe subsumiert wurden. Im Falle von Bürgerinitiativen aus der Anti-Atomkraft-Bewegung wurde eine Liste mit den Initiativen erstellt und neben einzelnen Mitgliedern auch die Gruppen angerufen oder / und per E-Mail angeschrieben. Insgesamt umfasste dieses Panel 38 Personen- und Gruppen-

namen. Von den 16 Personen, welche für beide Befragungsrunden zusagten, beantworteten 11 Personen den ersten Fragebogen. An der zweiten Fragerunde nahmen 10 Personen teil, allerdings war hier ein Teilnehmer, der nicht an der ersten Runde beteiligt. Die Zusammensetzung der Teilnehmenden-Gruppe sah wie folgt aus:

- Staatliche Institutionen, wie Bundes- und Landesbehörden: $n = 3$
- Wissenschaftliche Einrichtungen: $n = 4$
- Privatwirtschaft: $n = 2$
- Anti-Atom-Bewegung: $n = 0$
- Umweltverbände: $n = 1$
- Sonstige: $n = 1$.

Die Expertinnen und Experten der zweiten Runde setzten sich wie folgt zusammen:

- Staatliche Institutionen, wie Bundes- und Landesbehörden: $n = 2$
- Wissenschaftliche Einrichtungen: $n = 4$
- Privatwirtschaft: $n = 1$
- Anti-Atom-Bewegung: $n = 0$
- Umweltverbände: $n = 2$
- Sonstige: $n = 1$.

Zentrale Fragestellungen

Der Aufbau beider Fragebögen orientierte sich am Forschungsinteresse von ENTRIA, also den beiden Metakriterien Sicherheit und Gerechtigkeit, den drei Entsorgungsoptionen und den gesellschaftlichen und politischen Problemstellungen. Der erste folgte folgendem Aufbau:

- Block A: Generelle Fragestellungen zum realpolitischen Diskurs
- Block B: Drei Entsorgungsoptionen im Fokus von ENTRIA
- Block C: Sicherheit von Mensch und Umwelt als oberstes Ziel im gesamten Entsorgungsprozess

- Block D: Gerechtigkeitsfragen bei der Suche nach einem Lagerstandort
- Block E: Generelle Fragen zur Lagerung radioaktiver Reststoffe

Die Befragten sollten in den Blöcken A und B der ersten Runde Pro- und Contra-Argumente formulieren. Dabei war es wichtig, wie die einzelnen Personen diese Argumente subjektiv beurteilen, um zunächst einen möglichst großen und diversen Argumentationsraum aufzuspannen. Die Fragen der Blöcke C, D und E erinnerten mehr an das „klassische“ Delphi-Format, da hier explizit nach der subjektiven Position der Teilnehmenden gefragt wurde.

Zentral war die Auseinandersetzung mit möglichst vielen unterschiedlichen Argumenten, Überzeugungen und der Notwendigkeit ihrer kritischen Überprüfung. Daher wurden die Antworten der Teilnehmenden hinsichtlich ihrer impliziten Prämissen untersucht (Präsuppositionsanalyse). Diese war insbesondere für die Auswertung der ersten Runde einschlägig, da implizite Werturteile und Hintergrundannahmen den Inhalt einer Argumentation wesentlich bestimmen. Diese Argumentationen – ihrem „argumentativen Hintergrund“ geschuldet – prägten die Debatte zur Entsorgungsproblematik. Dieser philosophisch-analytische Zugriff ist eine Möglichkeit, um Dissense und Widersprüchlichkeiten besser nachvollziehen zu können: Implizite Wertungen und Prämissen werden sichtbar und somit diskurstauglich. Dies ist wichtig, da implizite Setzungen eine Argumentation wesentlich beeinflussen. Diese können im Widerspruch zu anderen Aussagen stehen. Wenn dies der Fall war, wurden die widersprüchlichen Prämissen und auch Konklusionen in der zweiten Befragung explizit zur Diskussion gestellt.

Zentrale Ergebnisse

Die Studie diente der Untersuchung zentraler Spannungsverhältnisse und Trade-Offs im Kontext der Entsorgung hoch radioaktiver Reststoffe. Da eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse in diesem Bericht zu viel Raum einnehmen würde, werden nur einzelne Schlaglichter benannt. Für eine ausführliche Besprechung siehe Ott u. a. (2018).

Im Unterschied zum Bürgerforum tendierten viele Antworten zur Priorisierung einer technisch-naturwissenschaftlichen Herangehensweise und es war eine starke Auseinandersetzung mit Fragen der Sicherheit festzustellen.

In verschiedenen Kontexten wird „Sachlichkeit“ betont. Zum Beispiel beziehen sich bestehende politische Konflikte auf Sachfragen, daher kön-

ne der Einbezug z. B. unbefangenerer jüngerer Generationen diese nicht abmildern. Optimierungen (z. B. mehr Transparenz) des Suchprozesses sind zwar wichtig, können jedoch das St.-Florians- oder NIMBY-Prinzip nur bedingt relativieren.

Wie im Bürgerforum existiert ein heterogenes Meinungsbild zum Thema Rückholbarkeit. Bedingte Zustimmung kam, da Rückholbarkeit durch den Eindruck, man könne jederzeit korrigierend eingreifen, beruhigend auf die Bevölkerung wirke. Allerdings sei kaum eine Situation vorstellbar, für welche die Rückholung tatsächlich sinnvoll wäre. Hier passt das Wort der „Akzeptanzförderung“, welches von einem Teilnehmenden benutzt wurde: Rückholbarkeit sei jedoch mehr als das, da sie die Qualität der Einlagerung radioaktiver Reststoffe mit sichern könne: Durch sie sei die Überprüfung der durchgeführten Maßnahme möglich und führt letztendlich zur Bewertung, ob ein Endlagersystem sich in die intendierte Richtung entwickelt hat oder nicht. Im Gegensatz dazu wählte eine Person „ich stimme nicht zu“, da sie die Rückholbarkeit als mit erheblichen Sicherheitsabstrichen verbundene Handlungsoption verstehe.

Reversibilitätsmöglichkeit von Entscheidungen im Verfahren wurde von allen als notwendig erachtet hinsichtlich der Fairness des Verfahrens (vollkommene und bedingte Zustimmung).

Hinsichtlich der Frage, ob intergenerationelle Gerechtigkeit primär die Herstellung von größtmöglicher Handlungsfreiheit für zukünftige Generationen bedeute, herrschte Meinungsverschiedenheit. Während drei der Befragten dem zustimmten, gab es weitere drei Personen, welche der Aussage bedingt zustimmten. Drei Teilnehmende stimmten nicht zu und eine Person wollte laut eigener Angabe die Frage nicht beantworten.

Die Zustimmung wurde mit der Betroffenheit zukünftiger Generationen von dann vergangenen Handlungen vorheriger Generationen begründet. Handlungsfreiheit sei hier außerdem wichtigster Optionswert.

Eingeschränkt wurde diese Priorisierung jedoch von einem Teilnehmenden, welcher mit bedingter Zustimmung erläuterte, dass diese Handlungsfreiheit von vornherein eingeschränkt sei, da die Vergangenheit zeige, dass, wenn einmal an einem Standort radioaktive Reststoffe lagern, dieser Ort auch zukünftig Lagerort sein würde.

Ein anderer Teilnehmender explizierte weiterhin, dass größtmögliche Handlungsfreiheit primär bedeute, heutzutage Entscheidungen so zu treffen, dass zukünftige Generationen am wenigsten Belastungen ertragen müssen.

Keine Zustimmung dazu, dass intergenerationelle Gerechtigkeit primär die Herstellung von größtmöglicher Handlungsfreiheit für zukünftige Generationen bedeute, gab es aus den folgenden Gründen: Erstens, wurde

darauf verwiesen, dass die Handlungsfreiheit die Sicherheit des Endlagers beeinträchtigt. Zweitens, stellte sich hier das Problem, dass die Handlungsfreiheit der kommenden Generationen für heutige Generationen ungerecht wäre. Drittens wurde darauf aufmerksam gemacht, dass an dieser Stelle nicht größtmögliche Handlungsfreiheit gegenüber Risiken gemeint sein sollte, die heutige Generationen als nicht akzeptabel einschätzten. Stattdessen soll versucht werden, Risiken auf Dauer zu minimieren und Sicherheit zu erzeugen. Handlungsfreiheit zukünftiger Generationen sei eine Frage von Information, zukünftiger Risikobereitschaft und zukünftigem Aufwand.

Fazit zum AP „Sicherheit, Gerechtigkeit, Diskurs: Kriterien, Verfahren und Gründe für die Endlagersuche“

Wir unterscheiden Eindrücke, Einsichten und Aussichten. Eindrücke beziehen sich auf die Wahrnehmung des politischen Prozesses, Einsichten beziehen sich direkt auf ENTRIA-Forschungen. Aussichten antizipieren Probleme der anstehenden Phase der Standortsuche.

Eindrücke. Der Umgang mit hoch radioaktiven Reststoffen, der durch die Erzeugung dieser Stoffe unvermeidlich wurde, stellt ein „dialektisches“ politisches Problem dar: Es droht die Routinen politischer Verfahren zu überfordern und muss doch auf dem Wege politischer und rechtlicher Verfahren einer Lösung zugeführt werden, die sich am Wert größtmöglicher Sicherheit orientiert. Vielen an diesem Verfahren Beteiligten dürfte der Gedanke gekommen sein, dass es besser gewesen wäre, diese Stoffe seien nie erzeugt worden. Der Zeitraum der Einlagerung übersteigt den Zeitraum der Nutzung der Kernenergie bei Weitem. Durch frühere Entscheidungen, deren Ergebnisse irreversibel sind, wurden Generationen, die vom (angeblichen) Nutzen der Kernenergie nicht mehr profitieren, dazu „verurteilt“, eine „hochwertige“ Problemlösung zu finden. Retrospektiv betrachtet, erscheint die Politik, Nuklearreaktoren ohne gesicherten Entsorgungsnachweis zu betreiben, als verantwortungslos. Ob diese Politik der Wirkmächtigkeit des Mythos‘ des „Atomzeitalters“ geschuldet war, sei dahingestellt⁶⁷. Das Framing des Atomausstiegs hat sich im neuen Diskurs durchgesetzt. Die Allokation der Reststoffe ist das letzte große Problem des Nuklearzeitalters („Altlast“). Diese „Altlast“ ist extrem kostenträchtig. Radioaktive Reststoffe erweisen sich als ein Musterbeispiel für „private profits, public costs“ (s.u.). Zieht man

⁶⁷Siehe hierzu (Bluhm, 1999, S. 203–224).

die volkswirtschaftlichen Opportunitätskosten für Erforschung und Entsorgung der Nuklearenergie umfassend in Betracht, so erweist sich im Nachhinein die Nuklearenergie als eine teure Technik. Vom moralischen Standpunkt aus betrachtet, wären Gesellschaft und Politik berechtigt, Nachforderungen an ehemalige AKW-Betreiber zu richten.

Es hat in den vergangenen Jahren durchaus Fortschritte bei der Problemlösung gegeben. Der Kommissionsbericht liegt vor; Institutionen sind eingerichtet worden (NBG, BGE, BfE). Das Vertrauen in eine sachlichere Lösung des Problems ist eher gestiegen. Die Legitimität des Suchprozesses wird nicht grundlegend in Frage gestellt. Diskursivität und Partizipation werden nicht nur beteuert, sondern durchaus praktiziert. Deliberative Demokratie (im Sinne von Habermas) erscheint nicht utopisch, wenngleich diese Debatte kein „idealer“ Diskurs sein kann. Ein Erfahrungsaustausch mit Ländern, die ähnliche Prozesse durchlaufen (Schweiz, Schweden), zeigt ähnliche Chancen und Risiken.

Einsichten. In der Philosophie versucht man, allgemeine Einsichten zu gewinnen und festzuhalten, hinter die nicht mehr zurückgegangen werden sollte. Begründete Einsichten, zu denen bestimmte Personen in bestimmten diskursiven Settings zu bestimmten Zeiten, d.h. in einem „context of discovery“ gekommen zu sein glauben, beanspruchen, im weiteren Verlauf der Debatte als Prämissen zu gelten. Diese Einsichten entstammen nicht der philosophischen Ethik, sondern bilden sich im Diskurs heraus. Die Ethik hält sie nur fest.

Zentrale Einsichten nach fünf Jahren ENTRIA:

1. Wir setzen im Anschluss an das Bürgerforum und den Kommissionsbericht voraus, dass Elemente der drei ENTRIA-Optionen mögliche Komponenten einer langfristigen Strategie sein werden, an deren Ende ein verschließbares bzw. zu verschließendes Tiefenlager steht.
2. Ein Paternalismus bei der Zukunftsverantwortung ist unvermeidlich. Wie sollen wir wissen, ob zukünftige Menschen lieber ein im Idealfall wartungsfreies Tiefenlager oder ein langfristig zugängliches Oberflächenlager wollen? Wir können vermuten, dass zukünftige Menschen in dieser Frage ähnlich uneins sein werden wie wir selbst.
3. Das abstrakte Prinzip der Zukunftsverantwortung erlaubt es, für und wider Zugänglichkeit zu argumentieren. Das konkretere Prin-

zip des Optionserhalts (Hubig, 1995), spricht (Kornwachs⁶⁸ (2017): „schwach“) zugunsten von Zugänglichkeit. Aber man kann auch sagen, das Prinzip des Vermächtniswertes (Hubig, 1995) spricht eher dagegen, wenn man zukünftige Generationen von Problemen entlasten möchte. Optionenmaximierung ist kein Prinzip des Zukunftshandelns, denn es könnte sein, dass zukünftige Generationen einige Optionen gerne „los“ wären. Es gibt einen Trade-Off zwischen Handlungsfreiheit und Sorgenfreiheit (aus Gesprächen mit Anne Eckhardt und Klaus-Jürgen Röhlig). Wenn ich in einer Hinsicht „sorgenfrei“ bin (z. B. weil ich keine Ressourcen mehr für die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle einsetzen muss), wächst meine Handlungsfreiheit an anderer Stelle (z. B. bei der Anpassung an den Klimawandel).

4. Zugängliche Lagerstätten verlangen kontinuierliches aufwändiges Management („Hüte“-Konzepte). Langfristige security ist nicht verlässlich prognostizierbar. Das Verhalten von geotechnischen Systemen (Wirtsgestein, Deckgebirge, Verschlussbauwerke) ist besser vorhersagbar als das von Menschen. Wer Zugänglichkeit fordert, muss leider auch über den Fall der Verteidigung der Anlage reden, nicht nur über das bessere zukünftige wissenschaftliche Wissen.
5. Die Zukunft ist nicht homogen; es bestehen Trade-Offs zwischen näherer und ferner Zukunft (Ott u. Semper, 2017). Höhere Suchkosten belasten die nähere Zukunft, könnten aber die fernere Zukunft sicherer machen. Aber um wieviel sicherer?
6. Nun kann Rückholbarkeit für viele Jahrzehnte garantiert werden (bis 2070, vielleicht auch länger). In der Bau- und Einlagerungsphase ist Rückholbarkeit vorgeschrieben. Erst hernach kommt es zu einer Phase, in der über Verschluss oder Offenhaltung zu entscheiden ist. Diese Entscheidung ist strikt als eine zukünftige offene Entscheidung zu denken. In jedem Fall sollte ein Tiefenlager so errichtet werden, dass sich zukünftige Generation für den Verschluss entscheiden können. (Vielleicht verlieren sie ja in einem Zeitalter erneuerbarer Energie jegliches Interesse an solchen toxischen Substanzen.)
7. Die zukünftige Entscheidungsgrundlage können wir im Jahre 2018ff nicht kennen, da in sie sämtliche weltweiten Erfahrungen mit ra-

⁶⁸Kornwachs, K. (2017): Dilemmata der Entsorgung nuklearen Abfalls - Impuls zur Diskussion: Ethik und Recht im Dialog über radioaktive Reststoffe. ENTRIA Veranstaltung „Radioaktive Abfälle – was nun?“ , Braunschweig, 30.09.2017

dioaktiven Reststoffen zwischen 2018 und 2080 eingehen werden, die wir prinzipiell nicht gedanklich simulieren können. Zukünftige Generationen haben das Recht, das Bergwerk in ein wartungsfreies Tiefenlager zu überführen; eine intergenerationelle Pflicht zur permanenten Offenhaltung lässt sich nicht begründen (Ott u. Semper, 2017).

8. Reh binder argumentierte auf der ENTRIA-Abschlusskonferenz 2017 aus rechtlicher Sicht, dass der Kommissionsbericht normative Tatsachen geschaffen habe. Die Empfehlung „Tiefenlager mit Rückholbarkeit“ sei Teil der neuen Rechtswirklichkeit geworden. Die Bedingung der Rückholbarkeit ist somit ethisch vertretbar, politisch gewollt und rechtlich festgelegt worden. Diese Rechtswirklichkeit sollte nicht unterschätzt werden, obwohl man Gesetze ändern kann. Die rechtliche Dimension wird neuartige Herausforderungen auch an das öffentliche Recht mit sich bringen.
9. Auch Kostengründe sind letztlich Gründe. Die Rückstellungen werden vermutlich nicht ausreichen. Trotzdem macht es einen Unterschied, um wieviel höher die Kosten ausfallen werden. Dass Opportunitätskosten irrelevant sind, wird keiner behaupten. Vielleicht brauchen zukünftige Generationen später mehr Geld für die globale Anpassung an den Klimawandel oder die sozialpolitische Integration der EU. In Zukunft sind mehr techno-ökonomische Analysen notwendig. Dies betrifft auch Trade-Offs zwischen Schacht Konrad, Asse und dem zu findenden Standort für ein Endlager.
10. Ein langer Such- und Entsorgungsprozess ist mit zusätzlichen Belastungen insbesondere für die Beschäftigten in Entsorgungsanlagen verbunden (Walther u. Riemann, 2017).
11. Politisch wäre eine Parallelsuche nach Oberflächen- und Endlagern extrem schwierig und kostenträchtig.
12. Langfristige Oberflächenlager haben das Potential strategischer Redundanz und der Absicherung gegenüber Verzögerungen (Riemann, 2017), bergen aber die Gefahr, dass die Suche nach einem Endlager „einschläft“ (Ott u. Budelmann, 2017).

Diese Einsichten stehen am Beginn der jetzt anstehenden nächsten Phase des zweiten Suchlaufs.

Aussichten. Für die nähere Zukunft stellt sich in beiden Dimensionen (Sicherheit, Gerechtigkeit) ein „timing“-Problem. Was bedeuten in diesem Zusammenhang zeitbezogene Werturteile („Verzögerung“, „Beschleunigung“)? Was meinen wir genau, wenn wir bspw. sagen, wir sollten uns bei der Standortsuche beeilen, ohne zu überstürzen?

Rein theoretisch kann man das Problem des sogenannten optimal stopping point heranziehen, um die Sinnhaftigkeit zusätzlicher Suchprozesse und Zugänglichkeit zu beurteilen. Wenn eine unaufhörliche Suche nach der allerbesten Lösung zu gar keiner Lösung führt (man sucht den allerbesten Lebenspartner und bleibt am Ende allein), dann ist nicht jede nochmalige Überprüfung ein Gewinn. Das Problem des optimal stopping point stellt sich auch in praktischen Diskursen. Wenn keine neuen Gründe vorgebracht werden und eine Endlosschleife an bekannten Gründen angesichts von Handlungs- und Zeitdruck keine zusätzlichen Rationalitätsgewinne mehr erbringt, ist es an der Zeit, zu Entscheidungen zu kommen. Dies betrifft sowohl die Standort- als auch (später) die Verschlussfrage.

Mögliche Freiwilligkeit und Kompensation wird zu einem deliberativen Thema im Standortauswahlprozess werden. Natürlich bleibt „best-/ größtmögliche Sicherheit“ hier vorausgesetzt. Aber möglicherweise gibt es Grenzen der Wissenschaft hinsichtlich des „best-“ bzw. „größt-“ möglichen: Was ist, wenn die Anzahl geeigneter („bestmöglich sicherer“) Standorte größer Eins ist? Was, wenn es keinen Sinn mehr macht, minimale Differenzen an Sicherheit (etwa unter einem Minimax-Kriterium) über extrem lange Zeiträume in Modellen berechnen zu wollen? Was, wenn die Wissenschaft an ihren Grenzen zugunsten der Politik abdankt (und gerade darin ihr Ethos hat)? Bereitwilligkeit als Präzisierung von Freiwilligkeit (Ott u. Riemann, 2018) könnte im Falle einer notwendigen Entscheidung die Rolle des „Züngleins an der Waage“ spielen.

Es gilt, nach der Auseinandersetzung mit einem „wicked problem“ die kommunikative Ebene auf ihre „wicked communication“ hin zu untersuchen, da sich in der sprachlichen Verständigung über die weiteren Schritte der Entsorgung und die Verteilung von Verantwortlichkeiten Konflikte herausbilden können, die ein deliberatives Verfahren zumindest erschweren.

Es besteht die Aufgabe, die diskursiven Rationalitätsgewinne der vergangenen Jahre in die nächste Phase „aufzuheben“. Es wäre auch denkbar, dass in der kommenden Suchphase die Formen der Kommunikation wieder in agonale Polemik übergehen. Hier bedarf es dringend institutionalisierter Sicherungen der Rationalitätsgewinne, d. h. eine Art „Diskurs-Gedächtnis“ als Wissensspeicher.

Folgender Punkt steht in nicht allzu ferner Zukunft zur Entscheidung an: Wenn man geologisch weiß, dass Kristallingestein Nachteile gegenüber Salz und Ton hat, soll dennoch aus Gründen der Parität ein Erkundungsbergwerk im Kristallingestein errichtet werden – oder nicht? Diese Frage ist direkt mit Interessen einzelner Bundesländer verknüpft. Wer ist befugt, diese Entscheidung zu treffen?

Die Suchprozesse könnten je nach veranschlagten Zeitbedarf und Verzögerungen eine langfristige Zwischenlagerung an der Oberfläche (LOL) unumgänglich machen (Ott u. Budelmann, 2017). LOL ist letztlich eine buying-time-Strategie, die vor der Frage steht, wofür man sich die Zeit kaufen möchte. Es bestehen Trade-Offs auf der Zeitschiene und im Hinblick auf Zugewinn an Sicherheit.

Eine Verbindung aus mehreren Standortproblemen: Zwischenlager, LOL, Konrad, Asse und Standortauswahl für ein Endlager, Problem der Wirtsgesteine birgt die Gefahr einer „Chaotisierung“ von Politik. Eine solche Verbindung ist zudem extrem kostspielig und der Öffentlichkeit schwer zu vermitteln. Insofern ist trotz der genannten Rationalitätsgewinne die Entsorgungsstrategie keineswegs „über den Berg“.

5.3.2 AP „Verfassungsrechtliche Anforderungen und verwaltungsrechtliche Implikationen“ (TU Braunschweig, Institut für Rechtswissenschaften)

Verfassungsrechtliche Anforderungen und verwaltungsrechtliche Implikationen

Als Teil des Transversalprojekts „Ethisch-moralische Begründung, rechtliche Voraussetzungen und Implikationen“ gehören zu dem Arbeitspaket des Instituts für Rechtswissenschaften (IRW) an der TU Braunschweig rechtliche, gesellschaftliche und ethische Fragestellungen.

Die Projektlaufzeit gab Anlass und bot die Chance, auf die erstmalige Verabschiedung wie die Novellierungen des Standortauswahlgesetzes einzugehen. Ferner wurden rechtswissenschaftliche Diskussionen, bestehende Rechtsfiguren und Regulierungsmuster genutzt und zum Anlass genommen, um einerseits die Rechtsdogmatik zu hinterfragen und andererseits daran anknüpfend in etlichen Fällen interdisziplinäre Kooperationen einzugehen. Dabei wurden durchweg fortschrittliche, innovative, interdisziplinär informierte Sichtweisen angestrebt und in zahlreichen Publikationen vertreten.

Folgerichtig war die Arbeit des AP Recht nicht primär auf klassisch-dogmatische Arbeit am Begriff, sondern vorrangig am Verständnis der

Neuen Verwaltungsrechtswissenschaft (Voßkuhle, 2012, insb. Rz. 37ff), im Sinne einer „offenen Rechtswissenschaft“ (Hoffmann-Riem, 2010) orientiert, die an Steuerungsfragen und Innovationen interessiert ist (Hoffmann-Riem, 2016). Dies schließt die Interpretation von Vorschriften mittels der juristischen Auslegungsregeln (Smeddinck, 2013a) nicht aus, sondern stellt einen essentiellen Bestandteil und die Grundlage für übergreifende Überlegungen und die Formulierung eines Reform- und Fortentwicklungsbedarfes dar.

So wie ENTRIA für diverse Disziplinen und die interdisziplinäre wissenschaftliche Durchdringung eine Art nachholende Modernisierung ermöglichte, so trifft das auch für den Bereich der rechtswissenschaftlichen Diskussion zu. Solange es – abgesehen von spezialgesetzlichen (z. B. Strahlenschutzrecht) und untergesetzlichen Sicherheitsanforderungen (z. B. des BMU von 2010) nur die Zulassung eines Endlagers lediglich knapp in Form des Planfeststellungsverfahrens im Atomgesetz geregelt war, gab es eben auch praktisch keine fortschrittsorientierte rechtswissenschaftliche Fachdiskussion.

Initialzündung dafür war das Standortauswahlgesetz (StandAG) von 2013, das nicht nur als Neustart apostrophiert wurde, sondern das eben auch mit einem innovativen Regelungsdesign, bisher beispiellosen Regelungen erkennbar bestrebt und darauf angelegt war, zum einen dem historischen Konflikt um die friedliche Nutzung der Kernenergie in Deutschland Rechnung zu tragen und zum anderen den Stand der neueren rechtswissenschaftlichen Diskussion zur Bürgerbeteiligung bei umstrittenen Infrastrukturprojekten im Gefolge der Konflikte um das Bahnhofprojekt Stuttgart 21 nicht zu verfehlen.

Das StandAG wird dauerhaft die Basis für die Standortsuche bilden. Hier waren und sind regulatorischen Innovationen enthalten, wie die Endlagerkommission, der eingeschränkte Rechtsschutz, die Legalplanung, die Abfolge vorgesehener gesetzlicher Entscheidungen, für die es zwar Vorbilder gibt, mit denen es aber in dieser Ausgestaltung und in diesem Umfeld keine praktische Erfahrungen gibt. Einerseits ist es so schwierig, die Wirksamkeit der Regelungen abzuschätzen. Andererseits erzeugen die Regelungen, eben weil sie neu sind, Unsicherheiten, Misstrauen und Widerstand. So muss das Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit sich erst Klarheit verschaffen, was eine lernende Verwaltung ausmacht und dann – insoweit wirkt das Recht auch stimulierend – entsprechende Maßnahmen umsetzen. Zunächst aber stehen aber weder eine gesicherte Dogmatik, noch belastbare Erfahrungswerte zur Verfügung. Generell ist eine Diskussion um das richtige Verhältnis von repräsentativer und direkter Demokratie und entsprechender Elemente entbrannt, die rechtswis-

senschaftlich wie gesellschaftlich weiter ausgekämpft werden muss. Die „deliberative Zwischenwelt“, die sich in der Gesellschaft herausgebildet hat (s. oben), wird ja nicht nur positiv gesehen. Auf diese Herausforderungen ist das für die Atommüllentsorgung relevante Recht bisher nicht ausgerichtet gewesen. Denn zuvor war die Rechtslage stark top-down und gerichtszentriert geprägt.

Die Suche nach einer sicheren Lösung für die Entsorgung der hoch radioaktiven Reststoffe birgt nicht nur die Aufgabe, einen Standort zu finden, der nach dem Standortauswahlgesetz die bestmögliche Sicherheit für eine Million Jahre gewährleistet, sondern stellt das Verfahren vor grundsätzliche Herausforderungen bezüglich seiner Ausgestaltung. Im Wege eines nationalen Konsenses zwischen Bund und Ländern, Staat und Gesellschaft sowie Bürgerinnen / Bürgern soll die Suche erfolgen. Dabei waren viele Rechtsfragen eines komplett neuen Gesetzes ungeklärt. Aufgrund von Nachfragen zum Gesetzestext von Kolleginnen und Kollegen aus ENTRIA wie aus der Gesellschaft wurde mit Hilfe externer Kräfte die Erarbeitung des ersten und einzigen juristischen Kommentars zum Standortauswahlgesetz geschultert. Außerdem wurden aufgrund solcher Impulse von außen Einzelfragen und gesellschaftliche Kritik zum Gesetz aufgegriffen und gewürdigt (Smeddinck u. Willmann, 2014; Smeddinck u. Semper, 2016).

Unmut und Kritik wurde verschiedenen Regelungsgehalten des Standortauswahlgesetzes entgegen gebracht. Dazu gehört vor allem die Frage des Rechtsschutzes. Auch die Regelungen der Öffentlichkeitsbeteiligung stießen auf Kritik. Vor allem die gewachsenen Erwartungen an Partizipation sind mitverantwortlich für die kritische Aufnahme des Gesetzes. Die Beteiligung der Öffentlichkeit war im StandAG 2013 in Form von Mindeststandards ausgestaltet. Die Öffentlichkeitsbeteiligung soll nach wie vor im Sinne eines dialogorientierten Prozesses stattfinden. Die prinzipielle Regelung signalisiert epochal den Willen zu einer neuen Herangehensweise. Es stellt sich allerdings die Frage, was unter einem dialogorientierten Prozess zu verstehen ist und wie weitgehend er im Vorhinein durch den Gesetzgeber reglementiert werden sollte (Smeddinck, 2017b, Rz. 37ff).

Das Standortauswahlgesetz 2013 stand schon aufgrund des Evaluationsauftrags an die Endlagerkommission auf dem Prüfstand. Die weiteren Novellierungen des Gesetzes bis hin zu der umfänglichen Überarbeitung im Anschluss an die Empfehlungen der Endlagerkommission wurden ebenfalls publizistisch begleitet (Smeddinck, 2017c).

Die Projektbeschreibung für das AP Recht wurde im Förderantrag insgesamt pragmatisch als flexible Grundlage genommen, die im Rahmen der

eigentlichen Zusammenarbeit in ENTRIA und in Reaktion auf die äußeren gesellschaftlichen Umstände flexibel und agil ausgefüllt wurde.

Eine Bandbreite ausgewählter Arbeiten und Ergebnisse des AP Recht sollen im Weiteren vorgestellt werden. Dabei kann nicht auf alle Detailergebnisse eingegangen werden. Sie ergeben sich aus der Vielzahl von Publikationen des AP Recht. Vielmehr wird darauf abgezielt, die behandelten Fragen und abschließende Einschätzungen vorzustellen. Die Belegtiefe ist für diese Darstellung reduziert worden.

Die Darstellung erfolgt in den Abschnitten Erste Analysen zum StandAG (S. 415), Rechtswissenschaftliche Grundlagen (S. 419) und Fokussierte Analysen (S. 425) sowie Fazit und Ausblick (S. 434)

Erste Analysen zum StandAG

In einer ersten Arbeitsphase wurde in drei Aufsätzen das Standortauswahlgesetz in unterschiedlicher Weise aufgegriffen.

Elemente des Standortauswahlgesetzes. Politischer Erfolg oder schon wieder eine Entmündigung der Bürger? Mit dem Standortauswahlgesetz beanspruchte die Politik, einen Neustart in der Suche nach einem Endlager für radioaktive Abfälle zu machen. Wichtige Elemente des Gesetzes wurden erstmals gewürdigt (Smeddinck, 2014). Das Gesetz passt in eine ganze Reihe jeweils unterschiedlicher, gesetzlich geregelter Partizipationsverfahren (z. B. Netzausbaubeschleunigungsgesetz, Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz). Zugleich erfordert die Singularität der Fragestellung ein eigenständiges Gesetzeswerk. Nach wie vor gilt rechtswissenschaftlich, dass der parlamentarische Prozess der Gesetzgebung das Gesetz zu dem staatlichen Handlungsinstrument mit dem transparentesten demokratischen Willensbildungsprozess macht (Krings, 2013, Rz. 1). In diesem Sinne hat der Gesetzgeber mit dem StandAG vieles richtig gemacht: Trotz der langfristigen Zukunftsorientierung werden der weitere (Planungs-)Prozess und die damit verbundene Gestaltungsmacht eben nicht an die Exekutive abgegeben, sondern das Parlament behält auf absehbare Zeit das Heft des Handelns in der Hand. Das StandAG ist aber auch ein Beispiel dafür, dass bei diesem Extrem-Problem – eine angemessene Lösung für die Lagerung radioaktiver Reststoffe zu finden – erst recht gilt, was auch sonst schon das Verhältnis von pluralistischer Gesellschaft und Gesetzen prägt: es ist angemessener, auf bestimmte Anforderungen an das Entscheidungsverfahren zu setzen, als feste materielle Vorgaben zu machen!

Weitergehend lässt sich das StandAG als Beispiel für „Governance as and by communication“ einordnen. (Schuppert, 2012, S. 62) fordert dafür „auch die Verfahrensstrukturen selbst kommunikativ zu entwickeln und sie als Produkt eines Kommunikationsprozesses, nicht als festgeschriebenen Rahmen für Kommunikation zu begreifen.“ Es ist bezeichnend, dass die politische Seite das hier als gegeben ansieht, während das Fernbleiben etlicher Umweltorganisationen beim dreitägigen BMU-Diskussionsforum in Berlin im Mai 2013 eher dafür spricht, dass zu spät angesetzt wurde und zu viele Vorgaben schon vorgeprägt waren, auch wenn es dann noch punktuelle Modifikationen gegeben hat und zukünftig geben kann.

Mit dem Ausklammern des Streits um ein weiteres aufnahmeberechtigtes Bundesland zur Zwischenlagerung von Castoren und dem Verzicht auf eine entsprechende Regelung ist das Standortauswahlgesetz der zivilgesellschaftlichen Forderung nach einem reinen „Rahmengesetz“ unfreiwillig ein Stück näher gekommen. In einer Art Fundamentalkritik wurde angezweifelt, dass durch einen Standortvergleich der relativ beste Standort für ein Endlager gefunden werden kann, dass ein neues Auswahlverfahren zu einem Sicherheitszuwachs führt und dass eine dauerhaft verbesserte Akzeptanz des zukünftigen Standortes erreicht werden kann (Brammer, 2010). Das zu widerlegen, kann sich nur aus der praktischen Abarbeitung des StandAG ergeben.

Partizipation bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Mehr Partizipation oder mehr Rechtsstaatlichkeit? Auf diese Formel ließ sich bereits 2013 der Diskurs über angemessene Formen der Bürgerbeteiligung zuspitzen. In dem rechts- und politikwissenschaftlichen Aufsatz Partizipation bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe (Smeddinck u. Roßegger, 2013) wurde nach grundsätzlichen Ausführungen und einer ersten Auseinandersetzung mit den Regelungen zur Öffentlichkeitsbeteiligung resümiert:

Weltweit werden Überlegungen zu einem angemessenen bis fortschrittlichen Standard für staatliches Handeln unter dem Stichwort „Good Governance“ diskutiert. Die repräsentative Demokratie als Grundpfeiler guter Regierungsführung soll ergänzt werden um Maßnahmen, die diese stärken, fördern und ihren Bestand nachhaltig sichern. Menschen, die regiert werden, müssten „das *Gefühl haben* [Hervorhebung U.S.], an den Prozessen der Regierungsführung beteiligt“ zu werden (Aziz, 2013, S. 185f). Es sei zu garantieren, dass alle Bürger eine Stimme haben und dass ihre Stimme gehört wird (ebd.). In welchem Umfang das realisiert wird, ist Frage des Ausgangspunkts und der Bereitschaft zu Lern- und Suchprozessen zur Ausformung der Öffentlichkeitsbeteiligung. Dass die alten Formen nicht mehr ausreichen, ist offensichtlich. Zwischen den Polen tradi-

tioneller Rechtsstaatlichkeit und fortschrittlicher Partizipation muss um eine angemessene, legitimitätsstiftende und durchsetzbare Balance gerungen werden. Für die Öffentlichkeitsbeteiligung generell bedeutet das die Umstellung von Interessenartikulation (auch im Vorfeld des Rechtsschutzes) hin zur Mitwirkung in demokratisch ausgerichteten Prozessen (Schink, 2011, S. 246).

Thema und Aufgabe bei der Standortsuche für radioaktive Reststoffe überschneiden sich mit dem herkömmlichen verbindlichen, aber nicht ausreichend legitimierenden Planfeststellungsverfahren und dem innovativen, aber nicht verbindlichen und für einen derartig unvergleichlichen Konflikt auch nicht ausgelegten Format der Zukunftskonferenz (Stichwort: Regionalentwicklung). Die vorgesehene Strategie den parlamentarischen Gesetzgeber mit mehreren aufeinander aufbauenden Gesetzen, zu befassen, sowie die rechtliche Rahmensetzung für weitere partizipative Elemente bei der Suche nach einem Standort für radioaktive Reststoffe – einschließlich der vorgesehenen Evaluierung – sind eine angemessene Form der schrittweisen Begleitung des Verfahrens und werden dem Good Governance-Ansatz grundsätzlich gerecht. Bereits das Gesetzgebungsverfahren hat das Ringen um das Maß an Öffentlichkeitsbeteiligung illustriert. Über die Ausgestaltung der Partizipation wird auch in den weiteren vorgesehenen Verfahrensschritten gestritten werden.

Aber auch wenn das konkrete Beispiel „Standortsuche für radioaktive Reststoffe“ große Aufmerksamkeit auf sich zieht und Engagement mobilisiert, sei an die generellen Einsichten erinnert, dass zum einen die Bevölkerung im Laufe eines langen Entscheidungsprozesses oft ihre Einstellung zu solchen Projekten verändert. Zum anderen ist zu beklagen, dass sich andere Teile der Bevölkerung und schwächere Milieus trotz des gestiegenen Interesses an Demokratie und Öffentlichkeitsbeteiligung zunehmend aus der politischen und gesellschaftlichen Meinungsbildung ausblenden oder eigene Echokammern bilden.

Verbindlichkeit der Kommissionsempfehlungen? Die Endlagerkommission nahm im Frühjahr 2014 ihre Arbeit auf. Bereits die Zusammensetzung wie später auch die Beteiligung der Umweltverbände und der Vorsitz waren umstritten. Mit dem Beginn der Arbeit der Kommission stellte sich die Frage nach ihren genauen Aufgaben und ihren Einflussmöglichkeiten. Konkret wurde gefragt, welchen Stellenwert die Kommissionsempfehlung nach § 4 Abs. 5 Standortauswahlgesetz hat (Smeddinck u. Willmann, 2014). Nach der hier vertretenen Ansicht kommt den Empfehlungen der Kommission keinerlei gesetzlich angeordnete Bindungswirkung für die nachherige Gesetzesentscheidung des Bundestages zu. Eine solche

Wirkung folgt weder aus den Empfehlungen als solchen, noch aus ihrem Zusammenspiel innerhalb der Regelung des § 4 Abs. 5 StandAG. Aber die Feststellung, die Ergebnisse der Kommission können den Bundestag nicht binden (Däuper u. von Bernstorff, 2014, S. 26), greift zu kurz:

Es ist vielmehr von einer hohen faktischen Bindungswirkung auszugehen! Vielleicht würde es kleinere akzentuierende Änderungen geben. Dann wäre auch dem Struckschen Gesetz genüge getan, wonach kein Gesetzentwurf den Bundestag unverändert verlässt. Aber der Gesetzgeber konnte schon prognostisch im Wesentlichen nicht von der Kommissionsempfehlung abweichen, weil sonst das extra-ordinäre Verfahren – das besondere Arrangement der Akteure – konterkariert würde und der erwünschte Zugewinn an Legitimation und Akzeptanz verloren ginge. Wenn es gilt, Entscheidungen und deren Durchsetzung zu erreichen, dann besteht am Abweichen gerade kein Interesse.

Tätigkeit und Aufgaben der Kommission bewegten sich nach dem Standortauswahlgesetz 2013 im Rahmen der Politikberatung: Es ist der Bundestag, der abschließend zu entscheiden hat. Außerdem folgte die Kommission modernen Tendenzen, indem nicht nur wissenschaftlich beraten wurde, sondern indem auch mit der Evaluierungsaufgabe der Beratungs- und Empfehlungsauftrag auf Teile der Verfahrensgestaltung ausgedehnt wurde. Die Grenze zwischen dem „Prozess der Wissensproduktion“ und dem „Prozess der Herstellung der politischen Entscheidung“ (Korinek u. Veit, 2013, S. 266) verschwamm. Auffällig ist im Weiteren, dass das Arrangement nicht auf den pluralistischen Austausch und die Konkurrenz der Empfehlungen im Meinungskampf und der politischen Debatte abzielte, sondern ein einstimmiges Ergebnis durch § 5 Abs. 1 S. 1 StandAG angepeilt wurde. Solche Anforderungen können auch zu einer problematischen Überdehnung der Expertenrolle führen (de Certeau, 1988, S. 44f).

Insgesamt bedeuten das Standortauswahlgesetz und seine mögliche Weiterentwicklung einen Spagat: (Kirchhof, 2004, S.237) betont, dass der Staat den Auftrag der parlamentarischen Demokratie verfehlt, wenn die Inhalte von Gesetzen eher (!) durch Verständigung zwischen Regierungen und gesellschaftlichen Gruppen vereinbart werden, als in parlamentarischen Debatten beraten und vom Parlament verantwortlich verabschiedet werden. Aus seiner Sicht wirkt die Demokratie so gerade nicht konsensstiftend, sondern wird von Interessengruppen zu Lasten der Allgemeinheit erobert. Andererseits ist das Modell der repräsentativen Demokratie in der derzeitigen Phase der Bemühungen um ein Atomendlager selbst nicht geeignet, den Konflikt zu befrieden. Insofern bleibt dem Gesetzgeber nichts anderes übrig, als Reformschritte zu gehen und neue Formen

und Arrangements zu erproben, wie er das mit dem Standortauswahlgesetz tut. Der Widerstand der Umweltverbände gegen eine Mitarbeit in der Kommission stellt die Leistungsfähigkeit und die Erfolgsaussichten des Gesetzes auf unabsehbare Weise infrage.

Ungeachtet dessen setzte das Standortauswahlgesetz mit der Kommission eine Entwicklung fort: Die Rolle staatlicher Regulierung in der politischen Steuerung verändert sich, verliert aber nicht an Bedeutung! (Jacob u. a., 2007, S. 25).

Rechtswissenschaftliche Grundlagen

Das AP Recht lieferte verschiedene rechtswissenschaftliche Grundlagenprodukte, die wichtige Materialien zugänglich und Entwicklungslinien nachvollziehbar machen sowie die neuen Regelungen des StandAG 2013 durchkommentiert haben.

Die Analyse der Rechtslage hat gezeigt, dass es kein geschlossenes Rechtsgebiet „Atommüllentsorgungsrecht“ gibt (Hohmuth, 2014). Das ist nicht überraschend, denn in der Vergangenheit standen die mit dem Betrieb der Kernkraftwerke verbundenen Rechtsfragen im Vordergrund. Die einschlägigen Rechtsmaterien werden natürlich weiterhin gebraucht: Aus dem Verfassungsrecht sind der Schutz der körperlichen Unversehrtheit (Art. 2 Abs. 2 Grundgesetz) und die Eigentumsfreiheit (Art. 14) etwa im Hinblick auf Entschädigungsfragen zu nennen. Im Verwaltungsrecht sind von zentraler Bedeutung das Atomgesetz und die Strahlenschutzverordnung, neuerdings das Strahlenschutzgesetz. Mit dem endgültigen Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland nach dem Unfall von Fukushima stellt sich die Aufgabe der Entsorgung radioaktiver Reststoffe drängender, unter neuem Blickwinkel und in ganz anderen Dimensionen. Das Recht der Atommüllentsorgung entwickelt sich im Grunde gerade erst. Den Kernbestand bildeten seit 1976 die Regelungen in § 9a ff. Atomgesetz (Hohmuth, 2014, S. 25f). Mit dem Standortauswahlgesetz liegt nun eine konkrete, sehr viel komplexere instrumentelle Ausformung vor.

Gesetzgebungsmaterialien. Mit dem Beschluss des Bundesrates vom 5. Juli 2013 erfolgte die letzte formal erforderliche Zustimmung zum StandAG. Das Gesetz ist gestuft am Tag der Verkündung und in Teilen am 1. Januar 2014 in Kraft getreten. Die Dokumentation der Gesetzgebung wurde in einem ersten Schritt in dem Materialband zum Standortauswahlgesetz in der Reihe „Rechtswissenschaftliche Arbeitspapiere der TU Braunschweig“ zusammengestellt und eingeleitet. Bereits zuvor wurden drei

Materialienbände zur Gesetzgebung der Standortauswahl vom IRW an der TU Braunschweig veröffentlicht.

Sammlung der einschlägigen Gesetzestexte. - Mit der Anfang 2014 erschienenen Textsammlung zum Recht der Atommüllentsorgung wurde der Neuakzentuierung des Atomrechts hinsichtlich der Fokussierung auf die Entsorgung radioaktiver Reststoffe Rechnung getragen. So wurden die einschlägigen Rechtstexte zusammengetragen und mit einer interpretierenden Einführung versehen (Smeddinck, 2014, S. 13f).

Die atomrechtspolitische Entwicklung seit 1980. Parallel dazu begannen die Arbeiten an einem Rechtsgutachten zur atomrechtspolitischen Entwicklung in Deutschland (Hohmuth, 2014). Diese ist in der Vergangenheit kaum umfassend und kompakt aufgearbeitet worden. Der Text war und ist sowohl für das rechtswissenschaftliche Arbeitspaket als auch für andere Teilprojekte ein wichtiges Arbeitsmittel. Zum einen sind in der bisherigen Rechtsentwicklung die Grundlagen für die gegenwärtige Rechtslage angelegt. Zum anderen spiegeln sich in der gegenwärtigen Rechtslage die zugrundeliegenden Interessenkonflikte und die jeweils auch in der Reaktion darauf gewählten Lösungsversuche und Regulierungselemente. Das Gutachten, das per F&E-Vertrag von einem externen Kooperationspartner erstellt und vom AP Recht betreut wurde, stellt eine nützliche und notwendige Erkenntnisquelle auch über ENTRIA hinaus dar. Die Rezension der Buchveröffentlichung fiel außerordentlich positiv aus (vgl. Faßbender (2015)).

Da die atomrechtspolitische Entwicklung vorrangig von den politischen Positionen der jeweiligen Bundesregierung zur Atomkraft bestimmt wurde, kann sie grob in zwei Phasen eingeteilt werden: Die Phase bis 1998 (Regierungen Schmidt (sozial-liberal) 1974 – 1982; Regierungen Kohl (konservativ-liberal), 1982 – 1998) war geprägt durch eine eher gleichbleibende Linie in der Atomrechtspolitik, der ein zunehmend politisierender Widerstand gegenüberstand, welcher letztlich in strengeren Anforderungen an die Risikoversorge durch Vollzug und Rechtsprechung mündete (Hohmuth, 2014, S. 12ff u.. 53). In der zweiten Phase ab 1998 erfolgte die maßgebliche Wende unter der rot-grünen Regierungen Schröder (1998 – 2005) mit dem rechtspolitisch umgesetzten Atomausstieg (Atomgesetz-Novelle 2002) die maßgebliche Wende (Hohmuth, 2014, S. 54ff u. 67). Hinzu kommt, dass die Politik (Regierung Merkel (wechselnde Koalitionen) seit 2005) zunehmend Abstand von einem „Top-Down“-Ansatz nimmt und aus Akzeptanzgründen verstärkt auf Partizipation und

Öffentlichkeitsbeteiligung (als „Bottom-up“-Ansatz) setzt (Hohmuth, 2014, S. 84).

Kommentierung Standortauswahlgesetz. Der weitaus größte Teil der disziplinären AP-Recht-Arbeiten betraf die Auseinandersetzung mit dem Standortauswahlgesetz, namentlich die Kommentierung (Smeddinck, 2017c), die verlässlich die Vorschriften des neuen Gesetzes erläutert. Dabei war von Anfang an der ehrgeizige Anspruch, einen Vollkommentar vorzulegen, der praktischen wie wissenschaftlichen Ansprüchen Rechnung trägt, was auch Anerkennung fand (Emanuel, 2017). Dabei war insbesondere auf staats- und verwaltungsrechtliche Literatur und die Rechtsprechung zurückzugreifen. Für das im Kern eher disziplinäre Produkt wurden u. a. die juristischen Auslegungsregeln genutzt wie punktuell auch naturwissenschaftlich-technische und sozialwissenschaftliche Erkenntnisse. Zur Ermittlung des Interesses von Nicht-Juristen wurden über den ENTRIA-internen BSCW-Server Fragen von Kolleginnen und Kollegen an das Gesetz gesammelt, Literaturhinweise berücksichtigt und einschlägigen Aspekte aus der Tagespresse aufgenommen.

Entwicklung der atomrechtswissenschaftlichen Diskussion. Die Grundlagenarbeiten wäre unvollständig ohne eine Sichtung des einschlägigen rechtswissenschaftlichen Schrifttums der vergangenen Jahrzehnte (Smeddinck, 2016a):

Das Recht hatte stets die Aufgabe, praktikable Lösungen und Entscheidungen von Konflikten verbindlich zu ermöglichen. Die Rechtswissenschaft dagegen widmete und widmet sich in klassischer dogmatischer Perspektive – im Meta-Diskurs – dem Vergleich, der Zuordnung und der Kritik von Rechtsfiguren im Rechtssystem (Wissenschaftsrat, 2012, S. 31).

Gerade unter dem Druck von Umweltproblemen musste sich das Recht weiterentwickeln und neue Perspektiven, Begriffe und Handlungsformen zur Verfügung stellen. Jetzt ging es häufig nicht mehr um die Lösung von Streitigkeiten zwischen zwei Kontrahenten, sondern die Konfliktverhältnisse wurden multipolar – die Interessen vieler sollten und sollen zu einem besseren Ausgleich gebracht werden (Hoffmann-Riem, 2005, S. 210). In der Rechtswissenschaft sind Einzelfallgerechtigkeit und rechtmäßige Lösung um die Perspektive der übergreifenden Steuerung und Zielerreichung ergänzt worden. Zugleich wurden die Probleme komplexer und immer häufiger grenzüberschreitend.

Entsprechend wird die Standortsuche nach einem Endlager für Atom-müll als ein vertracktes umweltpolitisches Problem eingeordnet, das kaum lösbar erscheint (Rehbinder, 2018; Brunnengräber u. a., 2016).

Die Art und Weise der Mitwirkung des Rechts an der bisherigen Nutzung der Kernenergie, aber auch an der Realisierung eines Endlagers ist kritisiert worden (Roßnagel, 1984). Für die neuerliche Suche und damit zusammenhängende Probleme stellt sich die Frage, wie gut Recht und Rechtswissenschaft aufgestellt sind, um den eigenen Beitrag im Zusammenwirken mit anderen Disziplinen, aber auch im gesellschaftlichen Diskurs, zur Lösung der Problematik zu leisten. In Anlehnung an andere Wissenschaftszweige, insbesondere an Helga Nowotnys Verständnis von „sozial robustem Wissen“, das „die Prozesse der Interaktion untersucht, in der Gesellschaft und Laien im Denken und in der Arbeit von NaturwissenschaftlerInnen präsent sind und durch die – so die Annahme – Wissen nicht nur wissenschaftsintern validiert wird, sondern auch für die Gesellschaft robust gemacht werden kann“ (Nowotny, 2005, S. 41), wurde die Idee einer robusten Rechtswissenschaft entwickelt:

Der Bedarf an robustem – auch rechtswissenschaftlichem Wissen – finden im Zusammenhang mit der Endlagersuche nicht nur im Denken und in der Forschungsarbeit statt: Institutionelle Arrangements, in denen der Dialog zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit geführt wird, gab es z. B. in Gestalt der Kommission nach §§ 3 und 4 Standortauswahlgesetz 2013.

Als praktische Konsequenz aus dem Expertendilemma – dem Gegeneinander von Expertise und Gegen-Expertise – kann als konkretes Beispiel die Regelung in § 3 Abs. 5 S. 1 Standortauswahlgesetz 2013 aufgefasst werden, dass die Kommission den Bericht zum Standortauswahlverfahren möglichst im Konsens, mindestens aber mit einer Mehrheit von zwei Dritteln ihrer Mitglieder beschließt. Von juristischer Seite wird zwar bezweifelt, dass es volle Übereinstimmung bei umstrittenen Projekten geben kann (Hien, 2012, S. 132). Verteidiger einer pluralistischen Demokratie werben für die „Nicht-Übereinstimmung“ als Ergebnis politischer Auseinandersetzungen (Somek, 2009, S. 335). Konsensuales wissenschaftliches Wissen reduziert die Chancen der politischen Akteure, wissenschaftliche Erkenntnisse selektiv allein zur Untermauerung der eigenen Positionen zu benutzen (Böcher, 2007, S. 29f). In der Endlagerkommission wurde ein konsensfähiger Abschlussbericht erarbeitet. Interdisziplinär orientierte rechtswissenschaftliche Forschung kann im Anschluss herausarbeiten, dass die Kommissionsempfehlungen keine rechtliche Bindungswirkung gegenüber dem Bundestag entfalten, wohl aber eine hohe faktische Bindung (Smeddinck u. Willmann, 2014).

Generell ist in Recht und Rechtswissenschaft die Lage ein Stück weit eine andere als in der Technikforschung, da es die wissenschaftsinterne Kritik wie den juristischen Instanzenzug durch die Gerichte – z. B. Verwaltungsgericht, Oberverwaltungsgericht, Bundesverwaltungsgericht, Bun-

desverfassungsgericht – als Formen der Selbstkritik, Selbstkorrektur und Validierung gibt. Daneben existiert aber noch zusätzlich das Bedürfnis, ja die Notwendigkeit für eine Robustheit der Rechtswissenschaft, die sich eben nicht primär in rechtlich richtigen Urteilen, in der Rechtsgewissheit, die sich in und aus der Verlässlichkeit gerichtlicher Einzelentscheidungen ergibt, ausdrückt (Zippelius, 1982, S.164f), über die mit Rechtsmitteln in den Instanzen gestritten werden kann.

Rechtswissenschaftliche Robustheit oder „robuste Rechtswissenschaft“ heißt, die eigenen Begriffe, Konzepte, Institutionen, verfassungsrechtliche Regelungen, Gesetze, Vorschriften auf für Laien und Nicht-Juristen verständliche Weise zu erklären, für Verständnis zu werben, aber auch die Bereitschaft gemeinsam darüber zu streiten. Zu Handlungsfeldern werden semi-wissenschaftliche und vopolitische wie politische Zusammenhänge, in denen sich die Rechtswissenschaft robust behaupten, denen sie sich jedenfalls auch aussetzen muss, ehe die Fremdreferenz – die Sachstrukturen in der Umwelt des Rechtssystems – wieder in die Selbstreferenzialität des autonomen Rechtssystem überführt und re-integriert werden kann (Vesting, 2007, Rz. 323).

Davor geht es um rechtliches und rechtswissenschaftliches Wissen, das von den potentiellen Abnehmern verstanden und akzeptiert werden kann. Weiter geht es dann um ein Mehr an Legitimität, Stabilität von Entscheidungen und das Vertrauen darin. Die Aussagen und Stellungnahmen müssen einfacher und leichter werden. Die Herausforderung ist, einerseits immer unwissenschaftlicher – unter Verzicht unverständlicher Fachbegriffe – zu formulieren und damit immer verständlicher zu werden – ohne andererseits in Banalität oder Polemik abzugleiten. Rechtliche Komplexität kann hier nicht konserviert und präsent gehalten werden, sondern muss reduziert werden. Bezogen auf die Thematik Endlagersuche und Endlagerforschung kann das bedeuten, zu erfahren, dass in öffentlichen Veranstaltungen die Wahrnehmungskapazitäten eines nicht-juristisch geprägten Publikums für juristische Einschätzungen und Kontraste denkbar gering ausgeprägt sind. Wie geht rechtswissenschaftliche Expertise und Einbettung damit um, dass Rezipienten nur das wahrnehmen, was sie hören wollen? – Generell stellt sich in der Endlagerszene das Problem des confirmation bias, vorgeprägter Haltungen, das Lösungen erschwert und eine vertiefende wissenschaftliche Behandlung verdient, z. B. in dem überkommene Narrative reflektiert und hinterfragt werden. – In Bezug auf die Arbeit der Kommission nach §§ 3 und 4 Standortauswahlgesetz 2013 konnte das bedeuten, eher Themen für eine mögliche Agenda zu benennen oder im weiteren Verlauf alternative Regelungsvorschläge zur Umgestaltung und Fortentwicklung des Rechtsrahmens zu formulieren. Rechtliche Kom-

plexität reduzieren, darf aber nicht heißen, vermeintlich alleinige Wahrheiten zu verkünden. Verantwortungsvoll robust zu agieren, muss auch bedeuten auf plurale bzw. gegenläufige Sichtweisen im Recht oder auf Ungewissheiten hinzuweisen (Kremer, 2013, S. 198f).

Generell und bisher stärker noch für politisch geprägte Zusammenhänge hat (Willke, 2005, S. 49) den Bedarf an (rechtlicher) Expertise verdeutlicht: Es geht um die Beteiligung an kommunikativen Prozessen, in denen nicht fertige Einsichten transportiert werden und in denen die Beteiligten ihre Lernfähigkeit unter Beweis stellen, um die notwendige differenzierten Sichtweisen aufzubauen. Das erfordert insbesondere, Kontingenz nicht in klassischer Weise in der Rechtsanwendung zu verengen, sondern zu erweitern, und möglichst kompetent mit Nichtwissen und Ungewissheit umzugehen. Eine solche Situationsbeschreibung erscheint angemessener als rechtswissenschaftliche Versuche, das Thema sachverständige Beratung auf das Abketteln des rechtlich Zulässigen zu fokussieren (Heintzen, 2014, Rz. 3ff).

Als Resümee konnte nach gründlicher Analyse festgehalten werden: Interdisziplinarität ist auch hier für die Rechtswissenschaft unverzichtbar. Für die Überprüfung der Richtigkeit und der durch Recht vermittelten Gerechtigkeit (oder Ungerechtigkeit) bedarf es des Rückgriffs auf Einsichten und Erkenntnisstand anderer Disziplinen. Die disziplinenübergreifende und am Problem orientierte Zusammenarbeit ist eine Möglichkeit, das Unbehagen am Recht (Wiethölter, 1968, S. 26f) zu reduzieren. Die einstmals in den 1960er Jahren konstatierte Isolation und das Dahinsiechen des Rechts sind durch interdisziplinären Auseinandersetzungen in der Rechtswissenschaft überwunden, mindestens aber drastisch reduziert worden. Die Veränderung des wissenschaftlichen Herangehens hat Rückwirkungen bis in die Rechtswissenschaft hinein und damit für die fachlich disziplinären Grundlagen von Gesetzgebung, die selbst wieder auf Interdisziplinarität angewiesen ist. Dank der Neuen Verwaltungsrechtswissenschaft der entwickelten neuen Perspektiven und methodischen Formen ist die Rechtswissenschaft für die interdisziplinäre Zusammenarbeit bestens gerüstet.

Neben den Begriffsklärungen von Multi- und Interdisziplinarität hat vor allem die Akzentuierung der Transdisziplinarität die Notwendigkeit einer robusten Rechtswissenschaft unterstrichen, die sich auch in fremdem Umfeld und Diskurs produktiv einbringen kann. Es besteht ein auch gesellschaftlicher Bedarf zur Bearbeitung und Lösung der Endlagersuche beizutragen.

Zum Arbeitsprogramm der Rechtswissenschaft gehört es, die Neuerungen und Modifizierungen, die insbesondere das Standortauswahlgesetz

gebracht hat, an den bestehenden Prinzipien der Rechtsstaatlichkeit und Demokratie zu messen und bezogen auf diesen konkreten Kontext neu zu durchdenken (vgl. (Wissenschaftsrat, 2012, S. 30). Das interdisziplinäre Gespräch und die Auseinandersetzung innerhalb von ENTRIA haben dabei geholfen, gemeinsame Konzepte und Vorstellungen zu entwickeln, die ggf. in einen bisher kontrastierenden rechtswissenschaftlichen Diskurs übernommen und transformiert werden können.

Nur wenn man Rechtswissenschaft mit Rechtsdogmatik gleichsetzt, haben Wissenschaftstheorie und Jurisprudenz keine Bezugspunkte und bleibt die Rechtswissenschaft ohne Anschlussmöglichkeiten in Exzellenzclustern und Forschungsverbünden (vgl. (Jestaedt, 2014, S. 3)), schneidet sich Anschlussmöglichkeiten und Lernerfahrungen ab. Wenn die Rechtswissenschaft dagegen offen und robust in inter- und transdisziplinären Zusammen agiert, schafft sie Schnittstellen, profitiert wie auch die anderen Beteiligten vom Geben und Nehmen im Austausch und hat keinen Grund, um ihre Eigenständigkeit zu fürchten.

Schließlich galt es auch, die Position der Rechtswissenschaft in der ENTRIA-Forschung wissenschaftstheoretisch reflexiv in interdisziplinäre Zusammenhänge einzuführen (Smeddinck, 2013b).

Wichtige fokussierte Analysen

Aufbauend auf den Grundlagenarbeiten, informiert durch den interdisziplinären Austausch und angeregt durch gesellschaftliche Entwicklungen, Kritik und Nachfragen wurde einige Themen einer fokussierten rechtswissenschaftlichen Analyse unterworfen:

(Gesellschaftliche) Kritik am Standortwahlgesetz. In Veranstaltungen zum Standortwahlgesetz gab und gibt es immer wieder großen Unmut und Kritik, wenn Regelungsinhalte des Gesetzes vorgestellt werden. Das wurde zum Anlass genommen, wiederholte Kritikpunkte am Gesetz, die insbesondere aus der interessierten Öffentlichkeit (aber auch von Juristinnen und Juristen) geäußert wurden, aufzugreifen und sie aus rechtswissenschaftlicher Sicht einzuordnen (Smeddinck u. Semper, 2016). Dabei ist auf die Differenz zwischen juristischer Dogmatik und Systematik auf der einen und gesellschaftlicher Auseinandersetzung über Recht auf der anderen Seite einzugehen – konkreter gewendet: auf das Verhältnis von der Verarbeitung von Gesetzesinhalten im Recht und der Wahrnehmung bestimmter Vorschriften oder Formulierungen von Gesetzestexten in der Gesellschaft.

Wie bereits angedeutet folgt das Regelungsdesign des Standortauswahlgesetzes neuesten regulatorischen Konzepten im Sinne von Governance as and by communication (Schuppert, 2012), ohne dem in vollem Umfang Rechnung zu tragen (vgl. Brunnengräber u. a. (2016)). Allerdings erreichte das Gesetz bisher keine alle erfassende kooperative Atmosphäre der Zusammenarbeit, weil das Gesetz selbst unter den üblichen Sachzwängen des Gesetzgebungsprozesses angefertigt wurde, ohne beispielsweise die Umweltverbände und andere Akteure der Anti-Atom-Bewegung, die gerade das forderten, in größerem Stile zu beteiligen.

Auf den vermeintlichen Geburtsfehler des Standortauswahlgesetzes, in die Erarbeitung des Gesetzes nicht hinreichend einbezogen worden zu sein, sollten Politik und Gesetzgeber mit einer Geste des guten Willens reagieren. Die Wünsche der Kritiker des Standortauswahlgesetzes sollten aufgenommen und ggf. Änderungen vorgenommen werden. Der Anspruch, auf Augenhöhe zu interagieren, wäre angesichts der heftigen, jahrzehntelangen Auseinandersetzungen um die friedliche Nutzung der Kernenergie eine einladende Geste zur Mitarbeit.

Das Ziel des Standortauswahlverfahrens, den Standort zu finden, der die bestmögliche Sicherheit für eine Million Jahre gewährleistet, wird durch einen engagierten und transparenten Fachdiskurs eingelöst werden müssen, an dem sich die Gesellschaft etwa in Gestalt des sog. gesellschaftlichen Begleitgremiums nach § 8 Standortauswahlgesetz intensiv und wachsam beteiligt.

Was die Öffentlichkeitsbeteiligung betrifft, geht das Gesetz neue Wege und zeigt sich offen für Veränderungen, was einem Paradigmenwechsel entspricht. Zugleich sind die Klagemöglichkeiten reduziert. Partizipation, Wissenschaftsbasierung und Transparenz des Suchprozesses (§ 1) verweisen auf die Kontrolle im öffentlichen Diskurs und in Fach-Diskursen. Zudem weist die richterliche Entscheidungsfindung generell durchaus qualitative Unterschiede auf (Knill u. a., 2012). Hinter dem Regulierungsdesign des Gesetzes steht aber zunächst ein grundlegender Wandel, der rechtswissenschaftlichen Erkenntnissen folgt.

Zum einen wird im Interesse guter Konfliktlösungen die Regulierungsarchitektur flexibilisiert: „Eine output-orientierte Betrachtung führt dazu, dass es nicht auf einzelne rechtsstaatliche und grundrechtliche Sicherungen (z. B. Beteiligungsrechte Drittbetroffener an informellen Verhandlungen), sondern auf das Gesamtniveau der Rahmenbedingungen im konkreten Fall ankommt. Entscheidend ist, was die Verwaltung insgesamt, sei es an informellem oder rechtsförmigen Verfahrensschritten unternommen hat, um eine gesetzesadäquate Interessenberücksichtigung sicherzustellen und für Transparenz zu sorgen. Eine solche Ge-

samtbetrachtung mit vielfältigen, im Einzelfall flexibel kombinierbaren Kompensationsmöglichkeiten vermeidet das Risiko effizienzfeindlicher Versteinerungen, das jeder punktuellen Verfahrensformalisierung anhaftet“ (Fehling, 2012, Rz. 114).

Zum anderen sind Schwächen des gerichtlichen Rechtsschutzes offenkundig, der sich strukturell bedingt ja auf die Entscheidung einzelner Rechtsfragen konzentrieren muss und auf die auch versteckte Gesamtkomplexität eines Konfliktes schlecht reagieren kann, mit der Folge, dass der Konflikt trotz Entscheidung nicht angemessen gelöst wird: „Häufig zeigt sich, dass ein konkreter Streit um einen bestimmten Rechtsanspruch nur die Spitze des Eisbergs eines größeren Streitfeldes ist, so dass eine angemessene Problemlösung über den Streitgegenstand im engeren Sinne (auf den ein gerichtliches Verfahren begrenzt ist) hinausreichen muss. Eine „möglichst richtige Entscheidung ist manchmal am ehesten zu finden, wenn der Problembewältigungsgegenstand ausgeweitet wird. Das kann nur dadurch geschehen, dass weitere rechtliche Konfliktzonen einbezogen werden, oder dass nicht rechtliche Konfliktzonen gesehen und bearbeitet werden (Mediation)“ (vgl. (Hoffmann-Riem, 2006, S. 7f)).

Das Regulierungsmodell des Standortauswahlgesetzes mag Unmut und Kritik auslösen. Zumal die Umweltverbände und andere Akteure der Anti-Atom-Bewegung gerade in der Auseinandersetzung um die Atomenergie vor den Gerichten immer wieder Erfolge erringen konnten. Die Bundesregierung reagierte mit der Verkürzung der Genehmigungswege und der engen Fassung von Klagerechten (Roose, 2010, S. 92 u. 98). Die Lage ist insofern nun aber eine besondere als es der Realisierung eines Endlagers in Deutschland bedarf und es keine rechtlich zulässigen Alternativen gibt.

Das Problem ist groß. Der Konflikt ist ebenfalls groß und politisiert. In der Gemengelage wird das Verhältnis der Verarbeitung von Gesetzesinhalten im Recht und der Wahrnehmung bestimmter Vorschriften oder Formulierungen von Gesetzestexten in der Gesellschaft aktualisiert (Brunnengräber u. Smeddinck, 2016). Es ist eine Aufgabe und Herausforderung für die Rechtswissenschaft, die Kritik, die in der Gesellschaft am StandAG formuliert wird, wahrzunehmen, aufzunehmen, einzuordnen und das rechtliche Verständnis zu verdeutlichen und juristische Sichtweisen in verständlicher Form zu erklären (Smeddinck, 2016a). Die Rechtswissenschaft kann sich nicht auf die Notwendigkeiten einer eigenständigen Fachwissenschaft zurückziehen (Depenheuer, 2014, Rz. 20), sondern muss sich transdisziplinär dem Diskurs mit der Gesellschaft stellen und ebenso Erkenntnisse formulieren, die sie in Richtung des Gesetzgebers artikuliert. Das kann aber auch bedeuten, gesellschaftliche Erwartungen an das Recht zu enttäuschen. Die Bandbreite juristischer Sichtweisen zu

ergänzen und andere, moderne Erkenntnisse und Konzepte vorzustellen, ist dennoch aufklärerische Pflicht.

Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Grenzwertfestlegung. Die gemeinsame interdisziplinäre Beschäftigung mit Grenzwerten in ENTRIA ist in den beteiligten Disziplinen auf je unterschiedliche Resonanz gestoßen und wurde folgenreich verarbeitet. Für die vom AP Recht abgeleitete Forderung nach einer verstärkten Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Grenzwertfestlegung (Smeddinck, 2016e) wurden zwei Diskussionsstränge in Beziehung gesetzt: das Misstrauen gegenüber Staat und Experten und die intradisziplinäre Bewegung zu einer verstärkten Partizipation bei der Erarbeitung von Rechtsverordnungen. Dadurch ergab sich ein merkwürdiger Kontrast zur überkommenen, nicht mehr zeitgemäßen umweltrechtswissenschaftlichen Dogmatik zur Anhörung beteiligter Kreise. Zum Zeitpunkt der Bearbeitung im AP Recht wurde hinsichtlich der Grenzwerte-Thematik sogar ein Wahrnehmungsstillstand (Röthel, 2011) im Umweltrecht konstatiert (offenbar der Befund, dass eine Zeitlang keine rechtswissenschaftlichen Publikationen zu Grenzwerten erschienen sind), der mittlerweile so nicht mehr besteht (Reinhardt, 2015). Die Einführung eines Strahlenschutzgesetzes stellt den Wert der Analyse nicht in Frage, da sie ohnehin mit übergreifender Zielrichtung angelegt war und das klassische Parlamentsgesetz diejenigen nicht allein glücklich macht, die ein Mehr an Öffentlichkeitsbeteiligung fordern.

Letztlich handelt es sich bei der Anhörung beteiligter Kreise bei der Erarbeitung von Grenzwerten trotz der stärkeren Einbeziehung Außenstehender, von ausgewählten Vertretern der Öffentlichkeit – angesichts der Forderungen und Standards von Öffentlichkeitsbeteiligung in anderen Zusammenhängen – immer noch um eine tendenziell „geschlossene Gestaltungsöffentlichkeit“ (Bösch, 2005, S. 244). Das verdeutlicht die Lehrbuchdarstellung: „Die angewandte Nuklearphysik und die Nuklearanlagentechnik sind Spezialmaterien, die nur von wenigen spezialisierten Unternehmen und privaten Sachverständigenorganisationen außerhalb der Technischen Hochschulen und Universitäten beherrscht werden“ (John, 2014, Rz. 143). Anders gewendet: Die Fachbruderschaft übt ein „Kastenregiment“ aus. Denn die Vorschläge der Expertengremien werden mehr oder minder direkt in die administrative Praxis übernommen und von den Verwaltungsgerichten im Regelfall als bindend hingenommen (Reinhardt, 2015, S. 290).

Die exekutivische Rechtsetzung in der jetzigen Form reduziert das entstandene Misstrauen nicht. Es ist auch nicht zu erwarten, dass in naher Zukunft die Konflikte dadurch gelöst werden können, dass die Menschen

wieder der Wissenschaft und dem Wissenschaftler vertrauen. Die offene Gesellschaft lebt von einem Pluralismus der Sichtweisen. Deshalb kann es auch in der Grenzwertbildung nicht um blindes und absolutes Vertrauen gehen, sondern um ein „sehendes und arbeitendes Vertrauen“ (Frevert, 2013, S. 65). Technokratische Arroganz und der autoritäre Gestus der Fachmänner vergangener Jahre ist nicht zielführend (Terkessidis, 2015, S. 19). In Politik und Recht hat der Verlust von Vertrauen oftmals gravierende Folgen. Deshalb sollten auch in der Verordnungsgebung nachhaltige Konsequenzen gezogen werden.

Die grundsätzliche fehlende Möglichkeit der Beteiligung beim Erlass von Rechtsverordnungen stellt auch generell ein Defizit dar. Der demokratische Charakter der Verordnungsgebung gehört gestärkt (Steiger, 2015, S. 100). Die Allgemeinzugänglichkeit und Neutralität von Normungsprozess und Normungsprodukt ist anzustreben. Die Öffentlichkeitsbeteiligung beim Erlass von Rechtsverordnungen sollte ausgeweitet werden. Nur so lässt sich in diesem Regulierungsformat eine kooperative Steuerungskultur unter Einbeziehung von Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft (vgl. (Renn u. a., 2014, S. 284) realisieren. Es gibt bereits Regulierungsbeispiele. Nach § 9 Raumordnungsgesetz⁶⁹ ist die Öffentlichkeit bei der Erstellung von Raumordnungsplänen, die als Rechtsverordnungen erlassen werden, zu beteiligen.

Bezogen auf das Politikfeld „Umgang mit radioaktiven Stoffen, Endlagerung und Strahlenschutz“ dürfte sich die Anstrengung einer erweiterten Öffentlichkeitsbeteiligung trotz der Langwierigkeit des Vertrauensaufbaus lohnen. Eine paradoxe Wirkung könnte von der abnehmenden Zahl von Experten im Atomsektor in Deutschland ausgehen. Die kritische Masse wird bereits gefährdet gesehen. Die Öffnung der verbleibenden Community für die Beteiligung der Öffentlichkeit, den Austausch, Diskurs, wechselseitiges Nachfragen und Infragestellen wird unerlässlich. Es gibt eine zunehmende wechselseitige Abhängigkeit zwischen Experten und interessierter Öffentlichkeit. Zugleich wird die Interaktion kalkulierbarer und belastbarer, je häufiger und intensiver Menschen interagieren (Frevert, 2013, S. 211). Damit ließe sich die Legitimation von Grenzwerten in Rechtsverordnungen – und damit die Chance auf Anerkennung durch die Regelungsadressaten – auf eine neue, zeitgemäße Basis stellen.

Kostengünstiger erzeugte Grenzwerte und schnelle Gesetze helfen nicht, wenn im Anschluss die Konflikte eskalieren und die Befriedung mit den hergebrachten Vorgehensweisen und Formaten nicht erreicht wird (Guckelberger, 2011, S. 57). Umgekehrt dürfte das Kommunizieren

⁶⁹Vom 22.12.2008 (BGBl. I S. 2986), zuletzt geändert durch G. vom 20.07.2017 (BGBl. I S. 2808).

von Unsicherheiten die Glaubwürdigkeit erhöhen! Wenn es richtig ist, dass anders als die Rechtsordnung suggeriert im Regelfall eindeutige, klare, richtige Lösungen in der Praxis nicht der Regelfall, sondern die Ausnahme sind (Böhm, 2005, S. 612), dann ist die Forderung nach Transparenz und Offenlegung des Nicht-Wissens die angemessene Begleitung der Risiken und Gefährdungen, die letztlich auch auf ein höheres Maß an Verständnis in der Gesellschaft hoffen darf.

Psychological turn in der Rechtswissenschaft. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit generell regt zu ganz unterschiedlichen disziplinären Anknüpfungen an. So konnten bisherige disziplinäre Diskussionsstände kontrastiert oder neue Trends intradisziplinär betont werden: Als Konsequenz der Kontrastierung zweier gänzlich unterschiedlicher innovativer Ansätze in der Entwicklung des Umweltrechts (Standortauswahlgesetz und Nudging) wurden vom AP Recht rechtswissenschaftliche Forschungsanstrengungen eingefordert, die stärker Psychologie und Verhalten in den Blick nehmen (Smeddinck, 2016b):

Die Gelegenheit scheint günstig, da sich in der Gesellschaft ein Zeitenwechsel in der Wahrnehmung und im Verhältnis zu Emotionen – mehr unbewusst als bewusst wahrgenommen – vollzogen hat. „Auch im Bereich der Problemlöse- und Entscheidungsforschung zieht die Interaktion zwischen Emotionen und Kognitionen nunmehr wachsende Aufmerksamkeit auf sich“ (Funke u. Holt, 2006, S. 78). Das neue (rechts-)wissenschaftliche Interesse an Emotionen ist da nicht mehr überraschend, sondern folgerichtig.

Da Juristerei und Rechtswissenschaft sich an klaren und sachlichen Argumenten orientieren und sich für rationale Entscheidungen und Analysen interessieren, sind Gefühle und Emotionen zunächst keine naheliegende Untersuchungsgegenstände, ja wurden aus dem eigenen Arbeitsbereich geradezu verbannt (Kroeschell, 1952, S. 747). Als Schattenseiten des Gerichtsverfahrens beschreibt (Raiser, 2013, S. 318) die Notwendigkeit, Konflikte zu domestizieren: „Die Umformulierung des Konfliktstoffs und die Eingrenzung auf die rechtlich relevanten Punkte verursachen eine *selektive Realitätsverarbeitung* [Hervorhebung des Autors], bei der die komplexeren Ursachen des Streits und die dahinter stehenden oder persönlichen oder gesellschaftlichen Spannungen nicht mehr in Erscheinung treten. Die Einbindung der Parteien in die vorgeprägten Rollen von Klägern und Beklagten verlangt von ihnen, ihr emotionales Engagement weitgehend zu unterdrücken.“

Lediglich das Rechtsgefühl erfreut sich traditioneller Anerkennung und Beachtung. (Hof, 1996, S. 38ff) hat in seiner Rechtsethologie die Be-

deutung von Gefühl, Empfinden und Intuition eingehender gewürdigt. Es zeichnet sich aber mittlerweile mehr und mehr Interesse für Emotionen und Verhalten ab. Zum einen hat insbesondere die Geschichtswissenschaft das Thema nachdrücklicher und umfassender aufgenommen und grundlegende Werke vorgelegt. Die Historikerin (Frevert, 2013, S. 16) stellt fest: „Die Vorstellung, Gefühle seien komplett irrational, bar jeder Vernunft und Verstandesleistung, kann als widerlegt gelten. Psychologen und Neurowissenschaftler verweisen stattdessen auf die enge Kopplung emotionaler und kognitiver Prozesse. So wie fast jeder kognitive Vorgang emotional gefühlt ist, gehen in Gefühle und Intuitionen immer auch Wahrnehmungen, Abwägungen und Urteile ein.“ Entsprechend werden neue wissenschaftliche Kooperationen praktiziert, wenn ein Politikwissenschaftler und eine Psychologin nach Gerechtigkeitsempfinden bei Großprojekten als Ursache von Konfliktsituationen fragen (Bandelow u. Thies, 2014).

Die aktuelle Rezeption des Themas Emotionen findet in der Rechtswissenschaft zunächst in ganz unterschiedlichen Bereichen statt: So werden etwa Kommunikationstechniken für die Gesprächsführung mit aggressiven und stark emotionalisierten Menschen im Rahmen von Gerichtsverhandlungen vorgestellt (Bielecke, 2013). Emotionen werden dann als nicht beachtete Bedürfnisse eines Menschen akzeptiert und Aggression als interaktiver Prozess zwischen den Beteiligten angesehen. Erkenntnisse aus Neurobiologie und Gehirnforschung sowie aus der Verhandlungslehre werden für die Durchführung von Insolvenzverfahren fruchtbar gemacht (Paulus u. Hörmann, 2013). Da insbesondere bei der Gestaltung familiärer Beziehungen Emotionen als menschliche Reaktionen unvermeidbar sind, wird weitergehend ihre Subsumtion unter gesetzliche Vorschriften und unbestimmte Rechtsbegriffe gefordert (Ehler, 2013, S. 503), die dafür einen Raum geben können.

In der Verwaltungsrechtswissenschaft hat das Auftreten der Wutbürger und die Renaissance der Wut als öffentlich bekundetes Gefühl das Interesse an neuen Formen der Konfliktbewältigung und Partizipation aktiviert. Neben einer Vielzahl von Publikationen ist insbesondere die Einführung der frühen Öffentlichkeitsbeteiligung in § 25 Abs. 3 Verwaltungsverfahrensgesetz hervorzuheben (Ziekow, 2013).

Über die Zusammenschau unterschiedlicher einzelner Entwicklungen hinaus erscheint es sinnvoll und produktiv, rechtswissenschaftlich grundsätzlicher anzusetzen. (Sunstein, 2014, S. 13) thematisiert den Aufstieg des „Psychological State“: „This term is not the advertising, because it seems a bit alarming; no one is likely to vote for a candidate who supports the Psychological State. But the term has the virtue of spotlighting ef-

forts, all over the world, to develop sensible, low cost policies with close reference to how human beings actually think and behave.“ Ob es ein neues (rechts)wissenschaftliches Paradigma braucht, sei dahingestellt. Aber: Welches Wissen über Emotionen lässt sich nutzen, um Konflikte, die auch rechtlich angeleitet sind und angegangen werden können, zu vermindern oder zu lösen? Wie lässt sich das Wissen über Emotionen und Verhalten in staatlichen Regulierungs- und Steuerungsüberlegungen nutzbar machen? Für alle Konflikttreiber wie subjektive Rechte, Interessen/Willen und Emotionen / Verhalten scheint es Formate zu geben, die für die Konfliktbearbeitung besonders adäquat und angemessen erscheinen. Von Forschungsinteresse ist, die Handlungsformen rechtswissenschaftlich anzuschauen und zu untersuchen, die bisher weniger beachtet wurden, sie generell als eigene Form wahrzunehmen oder als Alternative zu anderen Formaten ins Kalkül zu ziehen. Auch gilt es, die Formate der Konfliktbearbeitung unter dem Blickwinkel von Regulierungsstrategien und Governance eingehend in ihren Vor- und Nachteilen zu vergleichen.

Wie sehr das Thema an Bedeutung gewinnt, verdeutlichen die beiden Sammelbände zu Recht und Emotionen (Landweer u. Koppelberg, 2016; Landweer u. Bernhardt, 2017).

Resiliente Regulierung. Als einer der ersten Beiträge in der Rechtswissenschaft, der durch den Resilienz-Begriff inspiriert war, wurde das Standortauswahlgesetz als resiliente Regulierung gedeutet (Smeddinck, 2016d).

Resiliente Regulierung erzeugt Legitimation und bewirkt den Steuerungserfolg. Legitimation wird hier als Wirkmechanismus resilienter Regulierung aktualisiert. Die Sichtweise des AP Recht folgt der Prämisse, dass sich die Resilienz der Regulierung darin ausdrückt, ob ein Normprogramm, ein Regulierungsdesign befähigt ist, seine Ziele, den Gesetzeszweck zu erfüllen. Wenn ein Gesetz in der Lage ist, „auf eine Vielzahl von Anforderungen und Einwirkungen so zu reagieren, dass kein Schaden entsteht, ein Schaden begrenzt oder bewältigt wird, (...)“ (vgl. (Eckhardt u. Rippe, 2016, S. 84) so ist es resilient. Entsprechend manifestiert sich eine resiliente Regulierung am Outcome.

Das Standortauswahlgesetz überrascht in der Konsequenz mit der – in der Eigenart seines auf den ungewöhnlichen Gegenstand angepassten Regelungsdesigns – dieser Weg beschritten wird. Denn das Gesetz ist darauf angelegt, in der Tendenz eine maximale, vergleichsweise jedenfalls sehr hohe Legitimationsdichte zu erzeugen. Sie wird aus unterschiedlichen Quellen gespeist, die hier als Elemente einer resilienten Regulierung gedeutet und interpretiert werden: Wissenschaftsbasierung, Transparenz und Diskurs werden – mehr oder minder expliziert – über konkrete Re-

gelingen des Standortauswahlgesetzes vermittelt und fließen in die Gesamtlegitimationswirkung der gesetzlichen Entscheidungen mit ein. Die drei Elemente zielen auf das Kennzeichen für Resilienz im engeren Sinne „Berichtigung“ und Korrektur“ staatlichen Handelns in der Standortsuche – wenn es dieser bedarf. Wo sie kenntlich werden, ragt ein Element häufig besonders heraus, aber auch die andere können in verschiedenen Kombinationen und Intensitäten bemerkt werden. Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens dienten insbesondere die Regelungen zur Öffentlichkeitsbeteiligung in den §§ 5, 9 und 10 Standortauswahlgesetz 2013 sowie die gesetzlichen Entscheidungen am Ende bestimmter Phasen des Verfahrens der Transparenz.

Die Verfahrensregelungen und gesetzlichen Entscheidungen zur Stärkung der Legitimation bedeuten weitere Bewältigungskapazitäten (Weichselgartner, 2013, S. 29). Sie bilden ebenfalls einen Beitrag zur Resilienz im engeren Sinne, da so die Fähigkeit des Standortauswahlgesetzes zur Zielerreichung, widrigen äußeren Einflüssen zu widerstehen, gestärkt wird.

Aufgesetzt wird mit dem Regelungsdesign des Standortauswahlgesetzes auf das von (Appel, 2004, S. 332) beschriebene Grundmodell der Regulierung im Umgang mit Ungewissheit. Auch dieses Gesetz enthält ein Geflecht aus Ermittlungs-, Bewertungs- und Entscheidungsstufen, die den Umgang mit Ungewissheit strukturieren und ordnen. Bemerkenswert ist, dass in den konkreten Ausprägungen Erkenntnisse der sich gerade entwickelnden Endlager-bezogenen Resilienzforschung reflektiert werden, ohne jedenfalls im Standortauswahlgesetz in seiner aktuellen Fassung den Standards des neuen Forschungszweigs in allen Punkten zu entsprechen. Was fehlt im Sinne von Vertagen – als weiterer Erscheinungsform der Resilienz im engeren Sinne – sind z. B. Rücksprünge, also die Möglichkeit bei Ungewissheiten und fehlender Einigung im Umgang mit Fragen und Problemen auf einen früheren Punkt des Verfahrens zurückzukehren und dort neu anzusetzen (Blum, 2014, S. 55). Schnelligkeit und Effizienz müssen zugunsten von Resilienz und Sicherheit zurückstehen. Notwendige Lösungen so nicht nachfolgenden Generationen aufzubürden, wird dann zur Gratwanderung.

Ausdruck für Resilienz ist auch der gestiegene Regulierungsaufwand für den rechtlichen Neustart der Standortsuche für ein Endlager. Während früher in § 9b Abs. 1 Atomgesetz – mehr oder weniger – ein einziger Absatz als Rechtsgrundlage für die Realisierung eines Endlagers ausreichte („Die Errichtung, der Betrieb und die Stilllegung der in § 9a Abs. 3 genannten Anlagen des Bundes [d.h. zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, U.S.] sowie die wesentliche Veränderung solcher Anlagen oder ihres Be-

triebes bedürfen der Planfeststellung.“), enthält das Standortauswahlgesetz ca. 30 neue Paragraphen. Das ist neuen wissenschaftlichen Vorschlägen ebenso geschuldet wie dem Umstand, dass die bisherigen Versuche, ein Endlager in Deutschland für hoch radioaktive Abfälle zu realisieren, im Regulierungsdesaster endeten. Das Standortauswahlgesetz muss deshalb auch insgesamt als Versuch gewertet werden, eine resiliente Regulierungsstruktur zu schaffen, die den Konflikten und Widrigkeiten bei der Realisierung eines Endlagers standhält.

Offen ist, wie es nach Abschluss des Standortauswahlverfahrens weitergeht. Das Standortauswahlgesetz, erst recht das Atomgesetz sind für die dann anstehenden Aufgaben noch nicht resilient, im Sinne von zukunftsfähig ausgelegt und reguliert.

Rechtsfragen der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle. Schließlich sei auch hingewiesen auf die überobligatorische Auseinandersetzung mit Rechtsfragen der Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen (Semper, 2017), die hier nicht weiter ausgeführt wurden, da sie nicht zum engeren ENTRIA-Forschungsprogramm gehörten, das Portfolio aber sinnvoll und vorausschauend abgerundet haben.

Fazit und Ausblick

Das Standortauswahlverfahren und das Standortauswahlgesetz bedingen sich wechselseitig: Das Recht gebietet bestimmte Maßnahmen. Technische Möglichkeiten oder gesellschaftliche Forderungen beeinflussen rechtliche Vorgaben. Das wird auf Dauer so bleiben. Die Evaluierungspflichten, praktische Erfahrungen in der Anwendung des Gesetzes, die gesellschaftliche Wahrnehmung und der Diskurs über den Rechtsrahmen, nicht berücksichtigte naturwissenschaftlich-technische und rechtliche Problem werden weiteren Änderungs- und Fortentwicklungsbedarf auslösen. Eine zentrale Diskussions- und Konfliktlinie dürfte die adäquate Balance zwischen formellen und informellen Formaten der Öffentlichkeitsbeteiligung bleiben. Die fortschrittliche Attitude des Standortauswahlgesetzes dürfte dann erfolgreich sein, wenn die beteiligten Akteure sich davon anstecken lassen und nicht in eher hierarchisch anmutende Vorstellungen der eigenen Aufgabenwahrnehmung zurückfallen (vgl. einerseits (BfE, 2018, S. 16ff) und andererseits (Smeddinck, 2016c, S. 79f)).

Die Einbettung des AP Recht in ENTRIA konnte zeigen, dass bei einer innovationsorientierten, offenen Herangehensweise sich diverse produktive interdisziplinäre Kooperationen und Rückwirkungen auf das eigene

Fach erreichen lassen. Anschlussmöglichkeiten und Lernerfahrungen ergeben sich aus der Steuerungsperspektive und dem Interesse an der Wirksamkeit des Rechts. Nur wenn man wie (Jestaedt, 2014, S. 3) Rechtswissenschaft mit Rechtsdogmatik gleichsetzt, haben Wissenschaftstheorie und Jurisprudenz keine Bezugspunkte und bleibt die Rechtswissenschaft isoliert und ohne Resonanz in Exzellenzclustern und Forschungsverbünden!

Perspektivisch sollte die bereits angetippte Bedeutung von Kommunikation und Diskurs ((Smeddinck, 2017a, S. 203f); Brunnengräber u. Smeddinck (2016)) als Momente der Regulierung, die zu Legitimation und Resilienz des Rechts beitragen, vertieft untersucht werden.

Literatur

- [Allenfort u. a. 2015] Allenfort, Heike; Anders, Ortwin; Bader-Giese, Sylvia; Bernt, Oliver; Klos, Inge; Kussicke, Horst; Larisch, Heidi; Liebing, Claudia S.; Lieshoff, Thomas; Narberhaus-Höhner, Mechthild; Pommerenke, Kurt; Prescher, Andreas; Schwaab, Friedrich; Strauß, Ingrid; Tilmans, Anja; Wentzel, Gert; Westen, Timo; Wieder, Andreas: *Bürgergutachten „Wohin mit unserem Atommüll?“*. http://www.bundestag.de/blob/365600/a762d9d615164690cb2957db510cb605/kmat_20-data.pdf
- [Appel 2004] Appel, Ivo: Methodik des Umgangs mit Ungewißheit. In: *Methoden der Verwaltungsrechtswissenschaft*. Baden Baden: Nomos Verlag, 2004, S. 327–359
- [Aziz 2013] Aziz, Shaukat: Ein Plädoyer für „Good Governance“. In: *Kollektiver Rechtsbruch - Gefahr für unsere Freiheit*. Göttingen: Wallstein Verlag, 2013, S. 181–193
- [Bandelow u. Thies 2014] Bandelow, Nils C.; Thies, Barbara: Gerechtigkeitsempfinden bei Großprojekten als Ursache von Konfliktsituationen? Vertrauen und Legitimität als moderierende Faktoren illustriert am Beispiel der Konflikte um die Erweiterung des Frankfurter Flughafens. In: *Politische Psychologie – Journal of Political Psychology* 2014 (2014), Nr. 1, S. 24 ff
- [Bielecke 2013] Bielecke, Alexandra: Der Mensch ist dem Menschen kein Feind – Kommunikationstechniken für die Gesprächsführung mit aggressiven und stark emotionalisierten Menschen. In: *Familie, Partnerschaft, Recht* 19 (2013), S. 471–475

- [Bimesdörfer u. a. 2016] Bimesdörfer, Kathrin; Oerding, Simon; Riemann, Moritz: Endlager benötigen eine gesellschaftliche Betriebserlaubnis. Bürgergutachten „Wohin mit unserem Atommüll?“. In: (Brunnengräber, 2016), S. 409–430
- [Bлум 1999] Blум, Harald: Das Atomzeitalter. Varianten einer Epochenbestimmung. In: Fischer, Karsten (Hrsg.): *Neustart des Weltlaufs? Fiktion und Faszination der Zeitenwende*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1999, S. 203–224
- [Blum 2014] Blum, Dennis-Sebastian: *Die Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Auswahl eines Atommüllendlagers unter Berücksichtigung des Standortauswahlgesetzes*. Hamburg: Diplomica, 2014 (Nachhaltigkeit 58)
- [Brammer 2010] Brammer, Klaus J.: Neustart mit einem ergebnisoffenen Auswahlverfahren? In: *Endlager und kein Ende? Wege aus einer unendlichen Geschichte* Bd. 09. Loccum: Evangelische Akad. Loccum, 2010, S. 77–81
- [Brunnengräber 2016] Brunnengräber, Achim (Hrsg.): *Problemfälle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll*. Baden-Baden: edition sigma, 2016
- [Brunnengräber u. a. 2016] Brunnengräber, Achim; Mez, Lutz; Schreurs, Miranda A.: Das Endlager-Dilemma. Über den Umgang mit Atommüll. In: Leitschuh, Heike (Hrsg.); Michelsen, Gerd (Hrsg.); Simonis, Udo E. (Hrsg.); Sommer, Jörg (Hrsg.); Weizsäcker, Ernst U. (Hrsg.): *Jahrbuch Ökologie 2016* Bd. 2016. Stuttgart: S. Hitzel, 2016, S. 182–190
- [Brunnengräber u. Smeddinck 2016] Brunnengräber, Achim; Smeddinck, Ulrich: Möglichkeiten und Grenzen der Vereinheitlichung wissenschaftlicher Begriffe in der interdisziplinären Zusammenarbeit. Eine politik- und rechtswissenschaftliche Auseinandersetzung. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>. In: (Smeddinck u. a., 2016), 67–76
- [BfE 2018] Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit: *BfE - Zwischenlager*. https://www.bfe.bund.de/DE/ne/zwischenlager/zwischenlager_node.html, 2018
- [Buschka 2009] Buschka, Sonja: *Ethische Normen für eine zukünftigen Generationen gegenüber moralisch vertretbare (End-) Lagerung hochradioaktiver Abfälle*. Hamburg, Universität Hamburg (UHH), Masterarbeit, 2009

- [Böcher 2007] Böcher, Michael: Wissenschaftliche Politikberatung und politischer Prozess. In: *Macht Wissenschaft Politik? Erfahrungen wissenschaftlicher Beratung im Politikfeld Wald und Umwelt*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2007, S. 14–42
- [Böhm 2005] Böhm, Monika: Risikoregulierung und Risikokommunikation als interdisziplinäres Problem. In: *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht* (2005), Nr. 6, S. 609–615
- [Böschen 2005] Böschen, Stefan: Reflexive Wissenspolitik Formierung und Strukturierung von Gestaltungsöffentlichkeiten. In: *Wozu Experten? Ambivalenzen der Beziehung von Wissenschaft und Politik*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2005, S. 241–263
- [de Certeau 1988] Certeau, Michel de: *Kunst des Handelns*. Berlin: Merve, 1988
- [Cuhls 2009] Cuhls, Kerstin: Delphi-Befragungen in der Zukunftsforschung. In: *Zukunftsforschung und Zukunftsgestaltung*. Berlin: Springer, 2009, S. 207–221
- [Depenheuer 2014] Depenheuer, Otto: Sprache und Ziel der Gesetze. In: *Gesetzgebung: Rechtsetzung durch Parlamente und Verwaltungen sowie ihre gerichtliche Kontrolle*. Heidelberg: C.F. Müller, 2014, S. 137–159
- [Dienel 1978] Dienel, Peter C.: *Die Planungszelle*. Opladen: Westdeutscher Verlag, 1978
- [Däuper u. von Bernstorff 2014] Däuper, Olaf; von Bernstorff, Adrian: Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für die Endlagerung radioaktiver Abfälle – zugleich ein Vorschlag für die Agenda der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“. In: *Zeitschrift für Umweltrecht* 2014 (2014), Nr. 1, S. 24–32
- [Eckhardt u. Rippe 2016] Eckhardt, Anne; Rippe, Klaus P.: *Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Zürich: vdf Hochschulverlag, 2016
- [Ehler 2013] Ehler, Karl: Familienrecht – Wie subsumiert man eigentlich Emotionen? In: *Familie, Partnerschaft, Recht* 2013 (2013), Nr. 11, S. 500–503
- [Emanuel 2017] Emanuel, Florian: Rezension zu Ulrich Smddinck (Hrsg.): Standortauswahlgesetz (StandAG), Kommentar. In: *Zeitschrift für Neues Energierecht* 21 (2017), Nr. 2, S. 107

- [Faßbender 2015] Faßbender, Kurt: Rezension zu „Timo Hohmuth: Die atomrechtspolitische Entwicklung in Deutschland seit 1980. Darstellung, Analyse, Materialien“. In: *Archiv für öffentliches Recht* 140 (2015), Nr. 4, S. 650–653
- [Fehling 2012] Fehling, Michael: Informelles Verwaltungshandeln. In: *Grundlagen des Verwaltungsrechts. Informationsordnung - Verwaltungsverfahren - Handlungsformen* Bd. 2. 2. Aufl. München: Beck, 2012, S. 1557–1523
- [Frevert 2013] Frevert, Ute: *Vertrauensfragen: eine Obsession der Moderne*. München: Beck, 2013 (Beck'sche Reihe 6104)
- [Funke u. Holt 2006] Funke, Joachim; Holt, Daniel: Zur Rationalität von Emotionen beim Problemlösen: Eine psychologische Perspektive. In: *Kluges Entscheiden. Disziplinäre Grundlagen und interdisziplinäre Verknüpfungen*. Tübingen: Mohr Siebeck, 2006, S. 77–90
- [Guckelberger 2011] Guckelberger, Annette: Die Öffentlichkeitsbeteiligung beim Erlass von Rechtsverordnungen unter besonderer Berücksichtigung des Umweltrechts. In: *Jahrbuch des Umwelt- und Technikrechts 2011*. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 2011 (Umwelt- und Technikrecht (UTR) 110), S. 49–93
- [Habermas 1981] Habermas, Jürgen: *Theorie des kommunikativen Handelns. Band 1: Handlungsrationalität und gesellschaftliche Rationalisierung. Band 2: Zur Kritik der funktionalistischen Vernunft*. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1981
- [Habermas 1992] Habermas, Jürgen: *Faktizität und Geltung. Beiträge zur Diskurstheorie des Rechts und des demokratischen Rechtsstaats*. 1. Aufl. Frankfurt/M.: Suhrkamp, 1992
- [Heintzen 2014] Heintzen, M.: Externe Beratung in der Gesetzgebung. In: *Gesetzgebung: Rechtsetzung durch Parlamente und Verwaltungen sowie ihre gerichtliche Kontrolle*. Heidelberg: C.F. Müller, 2014, S. 229–247
- [Hien 2012] Hien, Eckart: Partizipation im Planungsverfahren. In: *Umwelt und Planungsrecht UPR-Zeitschrift für Wissenschaft und Praxis* (2012), S. 128–132
- [Hof 1996] Hof, Hagen: *Rechtsethologie – Recht im Kontext von Verhalten und außerrechtlicher Verhaltensregelung*. Heidelberg: R. v. Decker, 1996

- [Hoffmann-Riem 2005] Hoffmann-Riem, Wolfgang: Governance im Gewährleistungsstaat. Vom Nutzen der Governance-Perspektive für die Rechtswissenschaft. In: *Governance-Forschung: Vergewisserung über Stand und Entwicklungslinien*. Baden-Baden: Nomos, 2005, S. 195–220
- [Hoffmann-Riem 2006] Hoffmann-Riem, Wolfgang: Die Klugheit der Entscheidung ruht in ihrer Herstellung – selbst bei der Anwendung von Recht. In: Scherzberg, Arno (Hrsg.); Betsch, Tilmann (Hrsg.); Tagung, Erfurter S. (Hrsg.): *Kluges Entscheiden: disziplinäre Grundlagen und interdisziplinäre Verknüpfungen*; [... 17. - 19.02.2005 ... Ersten Erfurter Staatswissenschaftliche Tagung ...]. Tübingen: Mohr Siebeck, 2006 (Neue Staatswissenschaften 4), S. 3–23
- [Hoffmann-Riem 2010] Hoffmann-Riem, Wolfgang: *Offene Rechtswissenschaft: ausgewählte Schriften von Wolfgang Hoffmann-Riem mit begleitenden Analysen*. Tübingen: Mohr Siebeck, 2010
- [Hoffmann-Riem 2016] Hoffmann-Riem, Wolfgang: *Innovation und Recht, Recht und Innovation: Recht im Ensemble seiner Kontexte*. Tübingen: Mohr Siebeck, 2016
- [Hohmuth 2014] Hohmuth, Timo; Smeddinck, Ulrich (Hrsg.): *Die atom-rechtspolitische Entwicklung in Deutschland seit 1980. Darstellung, Analyse, Materialien*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2014
- [Hubig 1995] Hubig, Christoph: *Technik- und Wissenschaftsethik: Ein Leit-faden*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995
- [Häder 2014] Häder, Michael: *Delphi-Befragungen: Ein Arbeitsbuch*. 3. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2014
- [Jacob u. a. 2007] Jacob, Klaus; Biermann, Frank; Busch, Per-Olof; Feindt, Peter H.: Einleitung: Politik und Umwelt. Modernisierung politischer Systeme als Herausforderung an die Politikwissenschaft. In: Jacob, Klaus (Hrsg.); Biermann, Frank (Hrsg.); Busch, Per-Olof (Hrsg.); Feindt, Peter H. (Hrsg.): *Politik und Umwelt*. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2007 (Politische Vierteljahresschrift, Sonderheft 39), S. 11–41
- [Jestaedt 2014] Jestaedt, Matthias: Wissenschaft im Recht Rechtsdogmatik im Wissenschaftsvergleich. In: *JuristenZeitung* 69 (2014), Nr. 1, S. 1–12

- [John 2014] John, Michéle: Atomrecht. In: Koch, Hans-Joachim (Hrsg.): *Handbuch Umweltrecht*. 4. Aufl. München: Franz Vahlen, 2014, S. 577–636
- [Kant 1968] Kant, Immanuel: *Kritik der reinen Vernunft*. Darmstadt: de Gruyter, 1968 (Werke 3) – Nachdruck.
- [Kirchhof 2004] Kirchhof, Paul: Das Parlament als Mitte der Demokratie. In: Brenner, Michael (Hrsg.); Huber, Peter M. (Hrsg.); Möstl, Markus (Hrsg.): *Der Staat des Grundgesetzes – Kontinuität und Wandel: Festschrift für Peter Badura zum siebzigsten Geburtstag*. Tübingen: Mohr Siebeck, 2004, S. 244–262
- [Knill u. a. 2012] Knill, Christoph; Schäfer, Ansgar; Winkler, Daniela: Die Rechtsprechung der deutschen Oberverwaltungsgerichte im Vergleich – Ergebnisse einer Befragung unter Staatsrechtslehrern und Verwaltungsrichtern. In: *Verwaltungsarchiv: Zeitschrift für Verwaltungslehre, Verwaltungsrecht und Verwaltungspolitik* (2012), Nr. 103, S. 165–182
- [Korinek u. Veit 2013] Korinek, Rebecca-Lea; Veit, Silvia: Wissenschaftliche Politikberatung als Grenzarbeit: Ein Konzept zur Analyse institutionalisierter Beratungsformen in Politikfeldern. In: *der moderne staat – Zeitschrift für Public Policy, Recht und Management* Wissen und Expertise in Politik und Verwaltung (2013), Nr. Sonderheft 1/2013
- [Kremer 2013] Kremer, Carsten: Ungewissheit im Sicherheitsverwaltungsrecht. In: Augsberg, Ino (Hrsg.): *Extrajuridisches Wissen im Verwaltungsrecht: Analysen und Perspektiven*. Tübingen: Mohr Siebeck, 2013, S. 195–217
- [Krings 2013] Krings, Günter: Das Gesetz im demokratischen Verfassungsstaat. In: Krings, Günter (Hrsg.); Kluth, Winfried (Hrsg.): *Gesetzgebung. Ein Handbuch*. C.F. Müller, 2013, S. 40–46
- [Kroeschell 1952] Kroeschell, Karl: Gegen die Gefühlsjurisprudenz. In: *JuristenZeitung* 7 (1952), Nr. 24, S. 747
- [Köhnke u. a. 2017] Köhnke, Dennis (Hrsg.); Reichardt, Manuel (Hrsg.); Semper, Franziska (Hrsg.): *Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle: Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen*. Wiesbaden: Springer, 2017
- [Landweer u. Bernhardt 2017] Landweer, Hilge; Bernhardt, Fabian: *Recht und Emotion II: Sphären der Verletzlichkeit*. 1. Aufl. Freiburg, München: Verlag Karl Alber, 2017 (Recht und Emotion 2)

- [Landweer u. Koppelberg 2016] Landweer, Hilge; Koppelberg, Dirk: *Recht und Emotion I: Verkannte Zusammenhänge*. 1. Aufl. Freiburg, München: Verlag Karl Alber, 2016 (Recht und Emotion 1)
- [Luhmann 1991] Luhmann, Niklas: *Soziologie des Risikos*. Berlin, New York: De Gruyter, 1991
- [Nowotny 2005] Nowotny, Helga: Experten, Expertisen und imaginierte Laien. In: Bogner, Alexander (Hrsg.); Torgersen, Helge (Hrsg.): *Wozu Experten? Ambivalenzen der Beziehung von Wissenschaft und Politik*. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2005, S. 33–44
- [Ott 2000] Ott, Konrad: Zum Verhältnis von Diskursethik und diskursiver Technikfolgenabschätzung. In: *Diskurs: Begriff und Realisierung*. Würzburg: Königshausen & Neumann, 2000, S. 271–301
- [Ott 2014a] Ott, Konrad: Deliberative Zwischenreiche und Umweltpolitik. In: *Jahrbuch für Recht und Ethik* 22 (2014), S. 289–312
- [Ott 2014b] Ott, Konrad: Handeln auf Probe für die Ewigkeit? Die Einlagerung hochradioaktiver atomarer Reststoffe als eine Generationenaufgabe. In: Karafyllis, Nicole C. (Hrsg.): *Das Leben führen? Lebensführung zwischen Technikphilosophie und Lebensphilosophie. Für Günther Ropohl zum 75. Geburtstag*. Berlin: edition sigma, 2014, S. 240–259
- [Ott 2017] Ott, Konrad: Normative Pragmatics: Approach, Promise, Outlook. In: *Transcendental Arguments in Moral Theory*. Berlin, Boston: DeGruyter, 2017, S. 213–229
- [Ott u. Budelmann 2017] Ott, Konrad; Budelmann, Harald: Oder vielleicht doch nicht unter die Erde - Überlegungen zur Rolle der Oberflächenlagerung in einer Entsorgungsstrategie. In: (Köhnke u. a., 2017), S. 11–27
- [Ott u. a. 2018] Ott, Konrad; Pohlrs, Julia; Riemann, Moritz: Gaining knowledge by transdisciplinary research? To proportion views of lay-people and experts. (2018) – In Planung.
- [Ott u. Riemann 2018] Ott, Konrad; Riemann, Moritz: „Volenti non fiat iniuriam” – Freiwilligkeit und Bereitwilligkeit bei der Übernahme von Standortverantwortung. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2018, S. 42–60
- [Ott u. Semper 2017] Ott, Konrad; Semper, Franziska: Nicht von meiner Welt – Zukunftsverantwortung bei der Endlagerung von radioaktiven Reststoffen. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2017), Nr. 2, S. 100–102

- [Paulus u. Hörmann 2013] Paulus, Christoph G.; Hörmann, Martin: Emotionale Kompetenz im Insolvenzverfahren – Erkenntnisse aus Neurobiologie, Hirnforschung und Verhandlungslehre. In: *Neue Zeitschrift für Insolvenz- und Sanierungsrecht* 2013 (2013), Nr. 14–15, S. 623–631
- [Raiser 2013] Raiser, Thomas: *Grundlagen der Rechtssoziologie*. 6. Aufl. Tübingen: Mohr Siebeck, 2013 (UTB Rechtswissenschaft 2904)
- [Rehbinder 2018] Rehbinder, Eckard: Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und Rechtsschutz – ein Königsweg zur Lösung eines verzwickten Umweltproblems? In: *EurUP* 16 (2018), Nr. 1, S. 61–71
- [Reinhardt 2015] Reinhardt, Michael: Grenzwerte – Fluch oder Segen? Entwicklungslinien im Umweltrecht zwischen Rechtssicherheit und praktischer Urteilskraft. In: *Natur und Recht* 37 (2015), Mai, Nr. 5, S. 289–297
- [Renn u. a. 2014] Renn, Ortwin; Köck, Wolfgang; Schweizer, Pia-Johanna; Bovet, Jana; Benighaus, Christina; Scheel, Oliver; Schröter, Regina: Öffentlichkeitsbeteiligung bei Vorhaben der Energiewende – Neun Thesen zum Einsatz und zur Gestaltung der Öffentlichkeitsarbeit. In: *Zeitschrift für Umweltrecht* 2014 (2014), Nr. 5, S. 281–288
- [Riemann 2017] Riemann, Moritz: Gerechtigkeit an der Oberfläche. In: (Köhnke u. a., 2017), S. 159–171
- [Roose 2010] Roose, Jochen: Der endlose Streit um die Atomenergie. Konfliktsoziologische Untersuchung einer dauerhaften Auseinandersetzung. In: Feindt, Peter (Hrsg.); Saretzki, Thomas (Hrsg.): *Umwelt- und Technikkonflikte*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010, S. 79–103
- [Roßnagel 1984] Roßnagel, Alexander (Hrsg.): *Recht und Technik im Spannungsfeld der Kernenergiekontroverse*. Opladen: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1984
- [Röthel 2011] Röthel, Anne: *Techniksteuernde Grenzwerte – Wahrnehmungsstillstand und Zukunftsaufgabe*. 2011
- [Schink 2011] Schink, Alexander: Öffentlichkeitsbeteiligung – Beschleunigung – Akzeptanz: Vorschläge zur Verbesserung der Akzeptanz von Großprojekten durch Öffentlichkeitsbeteiligung. In: *Deutsches Verwaltungsblatt* 126 (2011), Nr. 22, S. 1377–1385

- [Schulz u. Renn 2009] Schulz, Marlen (Hrsg.); Renn, Ortwin (Hrsg.): *Das Gruppendelphi: Konzept und Fragebogenkonstruktion*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009
- [Schuppert 2012] Schuppert, Gunnar F.: Politikvermittlung als Kommunikation. In: Kersten, Jens (Hrsg.); Schuppert, Gunnar F. (Hrsg.): *Politikwechsel als Governanceproblem*. Baden-Baden: Nomos, 2012 (Schriften des Münchner Centrums für Governance-Forschung), S. 45–69
- [Semper 2017] Semper, Franziska: Kommentierung zu §§ 4 Abs. 1 bis 3, 11, 12, 14 - 19, Vorbemerkung zu §§ 13-20. In: (Smeddinck, 2017c)
- [Shrader-Frechette 1993] Shrader-Frechette, Kristin: *Burying Uncertainty. The Case against Geological Disposal of Nuclear Waste*. Berkeley: University of California Press, 1993
- [Skorupinski u. Ott 2000] Skorupinski, Barbara; Ott, Konrad: *Technikfolgenabschätzung und Ethik: eine Verhältnisbestimmung in Theorie und Praxis*. Zürich: vdf Hochschulverlag, 2000
- [Smeddinck 2013a] Smeddinck, Ulrich: Radioaktive Reststoffe. Lösungsoptionen aus Sicht der Rechtswissenschaft. In: *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis* 22 (2013), Nr. 3, S. 46–49
- [Smeddinck 2013b] Smeddinck, Ulrich: *Rechtliche Methodik: die Auslegungsregeln*. Braunschweig: Institut für Rechtswissenschaften, 2013 (Arbeitspapiere der Technischen Universität Braunschweig (RATUBS) 4/2013)
- [Smeddinck 2014] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.): *Das Recht der Atomentsorgung. Textsammlung mit Einführung*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2014
- [Smeddinck 2016a] Smeddinck, Ulrich: Atommüllentsorgung und robuste Rechtswissenschaft - Zugleich zum intradisziplinären Verständnis von Multi-, Inter- und Transdisziplinarität. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>. In: (Smeddinck u. a., 2016), 25–36
- [Smeddinck 2016b] Smeddinck, Ulrich: Innovative Ansätze im Umweltrecht. Standortauswahlgesetz und Nudge-Ansatz: rechtswissenschaftliche Forschung zu Emotionen und Verhalten als Perspektive. In: *Schriften zur rechtswissenschaftlichen Innovationsforschung. Innovationen im Recht* Bd. 11. Baden-Baden: Nomos, 2016, S. 403–437

- [Smeddinck 2016c] Smeddinck, Ulrich: Synergien oder Reibungsverluste? Wer koordiniert die Institutionen/Aktivitäten und führt sie zusammen? In: *Loccumer Protokolle. Endlagersuche. Endlager-Kommission und Öffentlichkeit(en): Fragen nach Zusammenarbeit und Fortschritten im Prozess zur Halbzeit der Kommission* Bd. 2014. Rehburg-Loccum: Evangelische Akademie Loccum, 2016, S. 69–80
- [Smeddinck 2016d] Smeddinck, Ulrich: Umgang mit Ungewissheit bei der Realisierung eines Endlagers für Atommüll - resilient reguliert? In: *Verwaltungsressourcen und Verwaltungsstrukturen. Management von Unsicherheit und Nichtwissen* Bd. 31. Baden-Baden: Nomos, 2016, S. 147–183
- [Smeddinck 2016e] Smeddinck, Ulrich: Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Grenzwertfestlegung - eine Perspektive für die Strahlenschutzverordnung. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2016, S. 81–112
- [Smeddinck 2017a] Smeddinck, Ulrich: Die Fortentwicklung des StandAG - Gesetzgebungsgeschichte, Beispiele, Reflektionen. In: *EurUP-Zeitschrift für Europäisches Umwelt- und Planungsrecht* 2017 (2017), Nr. 3, S. 195–295
- [Smeddinck 2017b] Smeddinck, Ulrich: Kommentierung zu §§ 1, 2, 5, 6, 8, 9, 10. (Smeddinck, 2017c)
- [Smeddinck 2017c] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.): *StandAG. Standortauswahlgesetz. Kommentar*. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2017
- [Smeddinck u. a. 2016] Smeddinck, Ulrich (Hrsg.); Kuppler, Sophie (Hrsg.); Chaudry, Saleem (Hrsg.): *Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016 <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-12254-6>
- [Smeddinck u. Roßegger 2013] Smeddinck, Ulrich; Roßegger, Ulf: Partizipation bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe - unter besonderer Berücksichtigung des Standortauswahlgesetzes. In: *Natur+Recht* 35 (2013), Nr. 8, S. 548–556
- [Smeddinck u. Semper 2016] Smeddinck, Ulrich; Semper, Franziska: Zur Kritik am Standortauswahlgesetz. Eine rechtswissenschaftliche Sicht auf gesellschaftspolitische Debatten. In: (Brunnengräber, 2016), S. 235–260

- [Smeddinck u. Willmann 2014] Smeddinck, Ulrich; Willmann, Sebastian: Die Kommissionsempfehlung nach § 4 Abs. 5 Standortauswahlgesetz. In: *Zeitschrift für Europäisches Umwelt- und Planungsrecht* 12 (2014), Nr. 2, S. 102–111
- [Somek 2009] Somek, Alexander: Demokratie als Verwaltung. Wider die deliberativ halbierte Demokratie. In: Brunkhorst, Hauke (Hrsg.): *Demokratie in der Weltgesellschaft*. Baden Baden: Nomos Verlag, 2009 (Soziale Welt Sonderband 18), S. 323–348
- [Steiger 2015] Steiger, Dominik: État, c'est moi! L'État, c'est nous! Legitimation von Staatsgewalt durch individuelle und kollektive Selbstbestimmung. In: Neubauer, Manuel P. (Hrsg.): *L'État, c'est quoi? Staatsgewalt im Wandel* Bd. 54. Baden Baden: Nomos Verlag, 2015, S. 79–104
- [Steinmüller 1997] Steinmüller, Karlheinz: Grundlagen und Methoden der Zukunftsforschung: Szenarien, Delphi, Technikvorausschau / SFZ. Gelsenkirchen, 1997 (21) – Forschungsbericht
- [Streffer u. a. 2011] Streffer, Christian; Gethmann, Carl F.; Kamp, Georg; Kröger, Wolfgang; Rehbinder, Eckard; Renn, Ortwin; Röhlig, Klaus-Jürgen: *Radioactive Waste. Technical and Normative Aspects of its Disposal*. Berlin: Springer, 2011 (Ethics of science and technology assessment 38)
- [Sunstein 2014] Sunstein, Cass R.: *Why nudge? the politics of libertarian paternalism*. New Haven: Yale University Press, 2014 (Storrs lectures on jurisprudence)
- [Terkessidis 2015] Terkessidis, Mark: *Kollaboration*. Berlin: Suhrkamp, 2015 (Edition Suhrkamp 2686)
- [Turoff 2002] Turoff, Murray: The Policy Delphi. <https://web.njit.edu/~turoff/pubs/delphibook/delphibook.pdf>. In: *The Delphi Method. Techniques and Applications*. 2002, 80–96 – Electronic version of the 1975 edition published by Addison-Wesley
- [Vesting 2007] Vesting, Thomas: *Rechtstheorie. Ein Studienbuch*. München: Beck, 2007 (Juristische Kurz-Lehrbücher)
- [Voßkuhle 2012] Voßkuhle, Andreas: § 1. Neue Verwaltungsrechtswissenschaft. In: *Grundlagen des Verwaltungsrechts. Band I*. 2. Aufl. Berlin: C. H. Beck, 2012, S. 1–64

- [Walther u. Riemann 2017] Walther, Clemens; Riemann, Moritz: Wie viel Strahlendosis für wen? Lange Lagerung, Offenhaltung und ein langer Entsorgungsprozess bedeuten zusätzliche Dosis für Beschäftigte. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2017), Nr. 2, S. 106–109
- [Weichselgartner 2013] Weichselgartner, Juergen: *Risiko, Wissen, Wandel: Strukturen und Diskurse problemorientierter Umweltforschung*. München: Oekom, 2013
- [Wiethölter 1968] Wiethölter, Rudolf: *Rechtswissenschaft*. Frankfurt/M: Fischer-Bücherei, 1968
- [Willke 2005] Willke, Helmut: Welche Expertise braucht die Politik? In: Bogner, Alexander (Hrsg.); Torgersen, Helge (Hrsg.): *Wozu Experten? Ambivalenzen der Beziehung von Wissenschaft und Politik*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2005, S. 45–63
- [Wissenschaftsrat 2012] Wissenschaftsrat (Hrsg.). Geschäftsstelle des Wissenschaftsrates: Perspektiven der Rechtswissenschaft in Deutschland. Situation, Analysen, Empfehlungen / Geschäftsstelle des Wissenschaftsrates. Köln, 2012 (2558-12) – Drucksache
- [Ziekow 2013] Ziekow, Jan: Frühe Öffentlichkeitsbeteiligung. Der Beginn einer neuen Verwaltungskultur. In: *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht (NVwZ)* 2013 (2013), Nr. 12, S. 754–760
- [Zippelius 1982] Zippelius, Reinhold: *Rechtsphilosophie: Ein Studienbuch*. 1. Aufl. München: Beck, 1982 (Kurzlehrbücher für das juristische Studium)

5.4 Transversalprojekt 4 - Interdisziplinäre Risikoforschung

Das Transversalprojekt (TP) „Interdisziplinäre Risikoforschung“ war vorwiegend auf Risiko und Sicherheit bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle ausgerichtet. In diesem TP wurden sowohl Methoden entwickelt und angewendet, um eine vergleichende Risikobewertung vorzunehmen, als auch verschiedene Ausprägungen radiologischer Belastungen genauer untersucht, die das Gesamtrisiko von Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Abfälle wesentlich beeinflussen. Mit der vergleichenden Risikobewertung leistete das TP einen Beitrag zur gesamthaft vergleichenden Bewertung von Entsorgungsoptionen im Rahmen von ENTRIA.

Im TP finden sich Arbeitspakete (AP), die darauf abzielen, mit empirischen Untersuchungen neue spezifische Erkenntnisse hervorzubringen, und solche, die vor allem auf der bestehenden Fachliteratur und – im Sinn eines transdisziplinären Ansatzes – unter anderem auch auf Erfahrungen mit politischen Prozessen, der Aufsichtspraxis von Behörden etc. beruhen. Gemeinsam trugen diese AP dazu bei, Risiko und Sicherheit bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle unter einer umfassenden, interdisziplinären Perspektive zu untersuchen. Damit wurden insbesondere Brücken zwischen natur- und ingenieurwissenschaftlichen und sozialwissenschaftlichen Erkenntnissen zu Risiken und Sicherheit geschlagen. Das TP umfasste sechs Arbeitspakete:

- Interdisziplinäre Risikoforschung
- Vergleich der radiologischen Gefährdung für verschiedene Entsorgungsoptionen
- Individuelle Dosimetrie für Beschäftigte in Entsorgungsanlagen
- Radionuklidquellterme für verschiedene Entsorgungsoptionen
- Einfluss der Radionuklidspeziation auf Transferfaktoren
- Langzeitsicherheit von Tiefenlagern

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Arbeitspakete dargestellt.

5.4.1 Interdisziplinäre Risikoforschung

Im Arbeitspaket „Interdisziplinäre Risikoforschung“ wurden die Risiken, die sich mit den Entsorgungsoptionen Endlagerung, Tiefenlagerung mit

Vorkehrungen für Überwachung und Rückholbarkeit sowie Oberflächenlagerung verbinden, vergleichend bewertet. Die Ergebnisse des Risikovergleichs wurden in einer „Risikokarte“ visualisiert.

Ausgangslage

International existieren verschiedene Publikationen, in denen ein Vergleich von Entsorgungsoptionen durchgeführt wird. Diese Vergleiche bewegen sich jedoch meistens auf einem hohen Abstraktionsniveau und wurden vor allem unter naturwissenschaftlich-technischen Gesichtspunkten durchgeführt. Bei ENTRIA bestand die Chance, einen vertieften Risikovergleich vorzunehmen und dabei Erkenntnisse aus verschiedenen, teils auch weiter auseinander liegenden Fachdisziplinen einzubeziehen.

Untersuchungsschwerpunkte

Im Arbeitspaket „Interdisziplinäre Risikoforschung“ wurden Grundlagen und Methoden für einen umfassenden Risikovergleich entwickelt. Zudem leistete das AP einen Beitrag zur Entwicklung der Referenzmodelle der bei ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen.

Im Verlauf erster Arbeiten zur vergleichenden Risikobewertung hatte sich gezeigt, dass die im Vorhaben ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen konkretisiert werden müssen, um aussagekräftige Vergleiche zu ermöglichen. Dazu wurden in Zusammenarbeit zwischen den Vertikalprojekten und dem AP „Interdisziplinäre Risikoforschung“ für alle drei untersuchten Entsorgungsoptionen Referenzmodelle entwickelt. Die Referenzmodelle sind standortunabhängig angelegt und bei den Tiefenlagern spezifisch für die Wirtsgesteine Salz und Ton. Sie zeichnen sich durch ihren „generischen“ Charakter aus, sind aber soweit ausgearbeitet, wie es für differenziertere vergleichende Bewertung notwendig ist. Über weite Teile der Laufzeit von ENTRIA fand innerhalb der Forschungsplattform ein Abstimmungsprozess zu den Referenzmodellen statt. Dabei wurde unter anderem festgehalten, dass alle Referenzmodelle die heute geltenden Genehmigungsanforderungen im Prinzip erfüllen müssen.

Bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle geben Fragen rund um Risiko und Sicherheit von Entsorgungsoptionen immer wieder Anlass zu Kontroversen. Diese Kontroversen betreffen sowohl die Auswahl der „sichersten“ Entsorgungsoption als auch die konkrete Ausgestaltung von Entsorgungsoptionen. Viele Kontroversen werden nicht nur durch Interessenkonflikte, sondern auch durch unterschiedliche Risikobegriffe in verschiedenen Fachdisziplinen, durch divergierende Risikowahrnehmung

gen, Wertvorstellungen und weitere Einflüsse geprägt, die die Einschätzung von Risiko und Sicherheit bei verschiedenen Akteuren unterschiedlich beeinflussen.

Eine wesentliche Zielsetzung des Arbeitspakets war es daher, eine vergleichende Risikobewertung vorzunehmen, die sowohl natur- und ingenieurwissenschaftlichen als auch sozial- und geisteswissenschaftlichen Erkenntnissen zum Thema Risiko Rechnung trägt und damit den Bedürfnissen verschiedener Akteure entgegenkommt. Im AP wurde ein breites Spektrum von Ansichten zu Risiko und Sicherheit berücksichtigt und es wurden Beiträge aus unterschiedlichen Fachdisziplinen integriert.

Die Begriffe „Risiko“ und „Sicherheit“ werden in unterschiedlichen wissenschaftlichen Fachdisziplinen und von verschiedenen gesellschaftlichen Akteuren unterschiedlich definiert und verwendet. Im Bestreben, der Vielfalt der Risikobegriffe aus interdisziplinärer Perspektive gerecht zu werden und die vielfältige Risikolandschaft rund um die Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle besser zu verstehen, stützte sich das AP auf das ENTRIA-Memorandum (Röhlig u. a., 2014). In diesem Memorandum wurden zentrale Spannungsfelder identifiziert, die das Forschungsgebiet kennzeichnen. Zudem wurde im AP ein breites Spektrum an Fachliteratur gesichtet und ausgewertet. Dazu zählten sowohl Publikationen, die sich mit Risiko und Sicherheit aus der Perspektive verschiedener Fachdisziplinen befassen, als auch solche, die auf die Risikowahrnehmung und die Meinungsbildung zu Risiken von Individuen und innerhalb gesellschaftlicher Gruppen ausgerichtet sind.

Bald nach dem Start von ENTRIA entstand ein Arbeitsbericht als Grundlage für die vergleichende Risikobewertung. In diesem Bericht, der in der ENTRIA-Schriftenreihe erschienen ist (Appel u. a., 2015), werden die zum Vergleich stehenden Entsorgungsoptionen näher beschrieben und eine erste Abwägung von risikobezogenen Vor- und Nachteilen vorgenommen. In einem interdisziplinären Workshop am ENTRIA-Projekttreffen 2013 wurde entschieden, die zahlreichen Verständnisse, die von Risiken existieren, zunächst zu disaggregieren, das heißt Faktoren zu betrachten, die in die Risikobegriffe verschiedener Fachdisziplinen sowie in die Wahrnehmung und den Umgang mit Risiken bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle eingehen. Die Ergebnisse einer entsprechenden Untersuchung sind im ENTRIA-Arbeitsbericht 05 dargelegt, der die Risikoansichten verschiedener Akteure bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle näher beleuchtet (Marti, 2016). Dabei zeigten sich mögliche konfliktlösende Ansätze.

Welche Rolle unterschiedlichen Risikoansichten bei der vergleichenden Risikobewertung zukommen soll, wurde aus ethischer Perspektive

untersucht und geklärt. Ergebnisse früher Untersuchungen im AP deuten darauf hin, dass bei der vergleichenden Risikobewertung nicht nur den Risiken, sondern auch den Ungewissheiten eine wesentliche Rolle zukommen muss. Daher wurde das Verhältnis von Risiken und Ungewissheiten bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle näher ausgeleuchtet (Eckhardt u. Rippe, 2016).

Zur vergleichenden Risikobewertung wurde die zeitliche Entwicklung der bei ENTRIA entwickelten Referenzmodelle in charakteristische Phasen untergliedert. Betrachtet wurde dabei nicht nur die Entwicklung der Entsorgungsanlage gemäß Referenzmodell, sondern auch von Aktivitäten, die in unmittelbarem Zusammenhang mit der gewählten Entsorgungsoption stehen, wie beispielsweise Zwischenlagerung und Transporte radioaktiver Materialien. Die Ergebnisse der Bewertung nach kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten wurden in der im Rahmen von ENTRIA entwickelten „Risikokarte“ entlang eines Zeitstrahls dargestellt.

Bei den kalkulierbaren Risiken wurde – den Erkenntnissen aus der Untersuchung der Risikolandschaft folgend – ein breites Spektrum von Risiken betrachtet, die Gesundheit oder Leben von Menschen beeinträchtigen. Dieses Spektrum reicht von psychischen Belastungen über Lärm- und Staubimmissionen bis zur Einwirkung ionisierender Strahlung und schließt auch die Möglichkeit von Arbeitsunfällen, Störfällen und unbefugten Einwirkungen Dritter ein. Bei der Einschätzung der Risiken wurde wenn möglich auf Fachliteratur Bezug genommen. Die Abwägung der Risiken gegeneinander wurde systematisch verbal-argumentativ vorgenommen.

Bei der vergleichenden Risikobewertung wird eine Option umso besser beurteilt, je geringer die mit ihr verbundenen kalkulierbaren Risiken und je geringer die mit ihr verbundenen Ungewissheiten sind. Ein hohes Maß an Ungewissheiten kann dazu führen, dass sich kalkulierbare Risiken nicht mehr bestimmen lassen. Bei der vergleichenden Bewertung von Ungewissheiten und kalkulierbaren Risiken kam ein Outranking-Verfahren zum Einsatz. Das Outranking bildet Präferenzen ab. Zum Abschluss der Untersuchung jeder Phase wurde mit einer Abwägung der Teilergebnisse für die betrachteten Entsorgungsoptionen das Outranking bestimmt, das in die Visualisierung der Ergebnisse der vergleichenden Risikobewertung, die Risikokarte einfließt. Der Optionenvergleich setzte die Referenzmodelle in Relation zueinander. Es wurde keine absolute Bewertung vorgenommen.

Mit Hilfe einer Analyse von Sicherheitsfunktionen und ihren jeweiligen Robustheiten sollen über die Ermittlung von Robustheitsdefiziten Stärken und Schwächen der Referenzmodelle ermittelt werden, die eben-

falls in die vergleichende Risikobewertung eingingen. Die vergleichende Bewertung nach Sicherheitsfunktionen und Robustheit knüpfte an die Ergebnisse des Projektes „Vergleichende Sicherheitsanalysen“ (VerSi) der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) an (Fischer-Appelt u. Baltes, 2010). In diesem Projekt waren Robustheitsdefizite identifiziert worden, die auf Schwachstellen verschiedener Tiefenlagersysteme hinweisen. Damit ließ sich ein Beitrag zur vergleichenden Bewertung von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen erzielen.

Im Rahmen des AP „Interdisziplinäre Risikoforschung“ bei ENTRIA wurden Robustheitsdefizite durch Zusammenführung der Relevanz der Sicherheitsfunktionen und ihrer jeweiligen Robustheit abgeleitet. Robustheitsdefizite wurden immer dann ermittelt, wenn eine deutliche Diskrepanz zwischen der Relevanz einer Sicherheitsfunktion und ihrer realen Robustheit festgestellt wurde. Da die formale Genehmigungsfähigkeit der Referenzmodelle vorausgesetzt wurde, bestand der Ansatz in der Identifizierung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der jeweiligen Referenzoptionen oberhalb des Niveaus der formalen Mindestanforderungen.

Ergebnisse

Die Forschungsarbeiten im Rahmen des AP zeigten, dass ein Vergleich der Risiken, die sich mit verschiedenen Entsorgungsoptionen verbinden, anspruchsvoll ist. Eine Ursache dafür ist die Vielfalt der Risikobegriffe in verschiedenen Fachdisziplinen und die Vielfalt der Risikoansichten von verschiedenen Akteuren. Eine weitere Ursache ist die Langfristigkeit jedes Entsorgungsvorhabens für hoch radioaktive Abfälle, da Ungewissheiten, die die Risikoeinschätzung erschweren, mit zunehmendem Zeithorizont anwachsen. Dies betrifft insbesondere Ungewissheiten, die auf menschliche Aktivitäten zurückgehen, einschließlich künftiger menschlicher Eingriffe in die Bio- und in die Geosphäre.

In der näheren Zukunft, bis etwa 30 Jahre nach der Entscheidung, einen bestimmten Entsorgungspfad zu beschreiten, unterscheiden sich die Muster von kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten, die mit den bei ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen verbunden sind, in der Risikokarte voneinander. Bei der ganzheitlichen vergleichenden Risikobewertung schneiden über diesen Zeitraum alle Optionen jedoch letztlich ähnlich ab. Die Endlagerung (ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit) erzielt ein etwas günstigeres Bewertungsergebnis als die anderen beiden untersuchten Optionen. Dies geht vor allem darauf zurück, dass die Endlagerung als bisher favorisierte Entsorgungsoption am besten untersucht

ist und für die Endlagerung auch beispielsweise behördlicherseits bereits die meisten Vorarbeiten geleistet wurden. Der Zeitraum bis etwa 30 Jahre nach der Entscheidung, einen Entsorgungspfad zu beschreiten, wird bei der Endlagerung und der Einlagerung mit Vorkehrungen für Überwachung und Rückholbarkeit vor allem durch Planung und Regulierung und das Standortauswahlverfahren, einschließlich erster untertägiger Erkundungen, bestimmt. Bei der Oberflächenlagerung ist auch der Bau der Entsorgungsanlage in dieser Phase inbegriffen.

In der mittleren Zukunft, zwischen 30 und etwa 100 Jahren nach der Entscheidung, einen bestimmten Entsorgungspfad zu beschreiten, ist die Oberflächenlagerung gegenüber der Tiefenlagerung mit Vorteilen verbunden. Diese Vorteile resultieren unter anderem daraus, dass das Oberflächenlager schneller als die Tiefenlager realisiert und dann voraussichtlich auf einem hohen Sicherheitsniveau betrieben werden kann. Viele der kalkulierbaren Risiken und Ungewissheiten, die mit dem Bau und dem Einlagerungsbetrieb eines Tiefenlagers verbunden sind, lassen sich mit dem Oberflächenlager zunächst vermeiden.

In Bezug auf die längerfristige Sicherheit ab ca. 100 Jahren nach der Entscheidung, einen bestimmten Entsorgungspfad zu beschreiten, weisen die Tiefenlager gegenüber der Oberflächenlagerung Vorteile auf. Nach dem Verschluss sollen die Tiefenlager passive Sicherheit gewährleisten – auch gegenüber Einwirkungen, die auf menschliche Aktivitäten zurückgehen. Zur Entwicklung der technischen und natürlichen Sicherheitsbarrieren sind Risikoeinschätzungen möglich. Wie der weitere Entsorgungspfad nach Beendigung der Oberflächenlagerung aussieht, ist dagegen vollkommen offen.

Bei der Endlagerung und der Einlagerung mit Vorkehrungen zu Überwachung und Rückholbarkeit zeigen die Abwägung von Risiken und Ungewissheiten und die Bewertung der Entsorgungsfunktionen nach Sicherheitsfunktionen und Robustheitsdefiziten ein differenziertes Muster mit Unterschieden zwischen den Wirtsgesteinen Salz und Ton auf.

Die bisherigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Einlagerung mit Vorkehrungen für Überwachung und Rückholbarkeit bereits 30 Jahre nach der Entscheidung für einen Entsorgungspfad gegenüber der Endlagerung gewisse Nachteile aufweist, die sowohl Risiken als auch Ungewissheiten betreffen. Erst über sehr lange Zeiträume heben sich die Unterschiede zwischen den beiden Tiefenlageroptionen allmählich auf. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass noch einmal überdacht werden sollte, inwieweit das gesellschaftliche Bedürfnis nach Überwachung und Kontrolle der hoch radioaktiven Abfälle primär durch technische Lösungen befriedigt werden soll.

Aufgrund der großen Ungewissheiten, die menschliche Aktivitäten und gesellschaftliche Entwicklungen in der mittleren Zukunft betreffen, sollten Entsorgungsoptionen konsequent auf Robustheit und Resilienz ausgerichtet sein. Dies betrifft nicht nur ingenieur- und naturwissenschaftlich ausgerichtete Maßnahmen, wo viele Vorkehrungen bereits getroffen wurden, sondern auch menschliche, organisatorische und gesellschaftliche Einflüsse auf die Entsorgungssicherheit.

5.4.2 Vergleich der radiologischen Gefährdung für verschiedene Entsorgungsoptionen

Im Arbeitspaket „Vergleich der radiologischen Gefährdung für verschiedene Entsorgungsoptionen“ wurde die Strahlenexposition von Beschäftigten in einem Tiefenlager mit und ohne Vorkehrungen für Rückholbarkeit mittels Simulationen miteinander verglichen. Die Ergebnisse des Projekts erlauben es, Risiken für Beschäftigte bei diesen beiden Entsorgungsoptionen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen gegeneinander abzuwägen.

Ausgangslage

In der Literatur sind Daten für das Radionuklidinventar der bestrahlten Brennelemente und HAW-Kokillen vorhanden. Mit (Peiffer u. a., 2011) liegen sehr detaillierte und gut dokumentierte Datensätze vor. Auch Rechnungen zur Dosisleistung an der Oberfläche eines Endlagerbehälters POLLUX®-10 sind in der Literatur verfügbar (Spilker u. Hüggenberg, 1991). Diese Rechnungen wurden allerdings für ein vereinfachtes, zweidimensionales Modell des Endlagerbehälters durchgeführt und gelten damit nur für einen Bereich der Seitenwand des Behälters. Seit der Veröffentlichung dieser Rechnungen wurden die damals gültigen Dosisgrößen für Neutronen und Photonen durch neue Werte ersetzt. Darüber hinaus wird vermutet, dass eine Wechselwirkung (Erzeugung von neutroneninduzierten Gammastrahlung) in den Ergebnissen in (Spilker u. Hüggenberg, 1991) nicht berücksichtigt ist.

Der Wechsel der Dosisgrößen und die Berücksichtigung der neutroneninduzierten Gammastrahlung führen zu etwas höheren Dosisleistungen. Die Berechnung der Dosisleistung mit einem Computerprogramm, das die Modellierung detaillierter, dreidimensionaler Geometrien ermöglicht, ist für die Abschätzung der Strahlenexposition essentiell. Rechnungen zur Dosisleistung an der Oberfläche des Behälterkonzepts POLLUX®-9 für HAW-Kokillen sind nicht bekannt. Rechnungen für die im Rahmen

von ENTRIA entwickelten Behälterkonzepte für Tonstein, Kristallin und Steinsalz lagen erstmals mit (Pönitz u. a., 2017) vor.

Eine Abschätzung der Strahlenexposition für geplante Arbeitsschritte wird von Strahlenschutzbevollmächtigten häufig durchgeführt. Fast immer erfolgt die Abschätzung konservativ, d. h. es werden Annahmen getroffen, die eher zu einer (deutlichen) Überschätzung der zu erwartenden Strahlenexposition führen. Um eine unausgewogene Wichtung zu Gunsten oder zu Lasten einer Entsorgungsoption zu vermeiden, erfordert ein Optionenvergleich jedoch eine möglichst realistische Einschätzung auf Grundlage plausibel begründeter Kriterien. Weder konservative noch realistische Abschätzungen der Strahlenexposition für Arbeitsschritte bei einer geplanten Rückholung von Endlagerbehältern sind bekannt.

Untersuchungsschwerpunkte

Wird die Option der Rückholung wahrgenommen, ergeben sich eine Vielzahl von notwendigen Arbeitsschritten. Diese und die zugehörigen Risiken sind auch in der vergleichenden Risikobewertung im Arbeitspaket „Interdisziplinäre Risikoforschung“ beschrieben. Einer dieser Arbeitsschritte ist die Rückholung der Endlagerbehälter an die Oberfläche. Bei der Einlagerung der Endlagerbehälter ist zu erwarten, dass ein großer Teil der Arbeitsschritte maschinell oder fernhantiert erfolgt. Für den Fall der Ausübung der Option der Rückholung wird jedoch angenommen, dass zumindest ein Teil der Arbeitsschritte einen Aufenthalt von Beschäftigten in der Nähe der Endlagerbehälter erfordert. Damit sind bei der Rückholung die Beschäftigten einer zusätzlichen Strahlenexposition ausgesetzt. Wie hoch diese ist, ist von der Dauer des Rückholvorgangs sowie der technischen Machbarkeit eines fernhantierten Rückholprozesses abhängig.

Die Abschätzung der Strahlenexposition erfordert die Kenntnis des Radionuklidinventars und der Strahlenfelder in der Umgebung des Endlagerbehälters. Für diesen Zweck wurden verschiedene Konzepte von Endlagerbehältern mit einem Programm für Strahlungstransport-Simulationen, MCNP (Sweezy, 2003) erstellt. Ausgangspunkt der Untersuchungen ist ein Konzept für einen Endlagerbehälter für das Wirtsgestein Steinsalz, das in Deutschland in den 1980er / 1990er Jahren entwickelt wurde (POLLUX®). Da im StandAG, das 2014 in Kraft getreten ist, neben dem Wirtsgestein Steinsalz auch Tongestein und Kristallingestein genannt sind, wurden die Untersuchungen auf Endlagerbehälterkonzepte für diese Wirtsgesteine ausgedehnt. Als Grundlagen für die Modellierung dienen die generischen Endlagerkonzepte (ENCON), die im Rahmen des VP6 im Institut für Werk-

stoffkunde entwickelt werden (siehe auch die Diskussion ab Seite 27 in Kapitel 3.1).

POLLUX®-10. Der im vorliegenden AP behandelte POLLUX®-10 ist für die Endlagerung von den Brennstäben aus 10 Druckwasserreaktor-(DWR)-Brennelementen konzipiert. Anhand von Angaben aus der Literatur (Peiffer u. a., 2011) sowie Behälter- und Materialdaten, die im Institut für Werkstoffkunde zusammengetragen wurden (Maier, 2014) wurde ein detailliertes Modell des Endlagerbehälters für das Strahlungstransport-Programm MCNP (Sweezy, 2003) erstellt. Das beinhaltet eine Modellierung der einzelnen Brennstäbe in den fünf Tragkörben des POLLUX®-10. Ausgehend von diesem Modell wurden verschiedene Beladungen, Moderatormaterialien und Anordnungen des Moderatormaterials untersucht. Die Untersuchung von verschiedenen Beladungen ist dadurch motiviert, dass bestrahlte Brennstäbe mit Plutonium-Uran-Mischoxid (MOX) als Brennstoff eine erheblich größere Neutronenquelle darstellen als UO_2 als Brennstoff. Gleichzeitig stellen bestrahlte MOX-Brennelemente in den hier betrachteten Zeiträumen nach der Entnahme aus dem Reaktor eine erheblich größere Wärmequelle dar als UO_2 -Brennelemente. Die Untersuchung verschiedener Moderatormaterialien und ihrer Anordnung ist durch das Optimierungsgebot des Strahlenschutzes begründet.

POLLUX®-9. Ausgehend vom Konzept des POLLUX®-10 wurde ein Endlagerbehälter für die Streckenlagerung von 9 Kokillen mit verglasten Spaltproduktlösungen (HAW-Kokillen) modelliert, der in Anlehnung an (Bollingerfehr, 2011) als POLLUX®-9 bezeichnet wird. Im Gegensatz zu den Annahmen in (Bollingerfehr, 2011) erwies sich eine Änderung der Außenmaße als notwendig. Es wurden Maßnahmen zur Verbesserung der Strahlungsabschirmung untersucht.

ENCON. In ersten Tests erfolgte die Modellierung der Behälterkonzepte mit einer einheitlichen, an das POLLUX®-3-Konzept angelehnten Beladung mit den Brennstäben aus 3 DWR-Brennelementen. In einem zweiten Schritt erfolgten Simulationen für Behälter für Tonstein, Kristallin und Steinsalz (ENCON-TS, ENCON-K und ENCON-S) mit den Brennstäben aus 4, 5 bzw. 8 DWR-Brennelementen. Mit der veränderten Beladung wird der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit der Wirtsgesteine Tonstein, Kristallin und Salz Rechnung getragen (Stahlmann u. a., 2015). Die gegenüber dem POLLUX®-10 reduzierte Beladung des ENCON-S ist dadurch motiviert, dass in einigen (Bechthold u. a., 2004; Ziegenhagen u. a.,

2005), jedoch nicht allen (Bollingerfehr u. a., 2012) Publikationen eine geringere Auslegungstemperatur von 100 °C für die Option der Rückholung gefordert wird.

Abweichend zu den Überlegungen für die Behälterkonzepte für bestrahlte Brennstäbe wurde für die Modellierung der Endlagerbehälter für HAW-Kokillen für Tonstein, Kristallin und Steinsalz eine einheitliche Beladung mit 3 Kokillen gewählt. Dadurch wird zum einen der Vergleich der verschiedenen Behälterkonzepte erleichtert. Zum zweiten verhindert die Anordnung von drei übereinander gestapelten HAW-Kokillen die Bildung großer Hohlräume, wie sie im POLLUX®-9 entstehen. Die im IW diskutierte alternative Beladung mit vier übereinander gestapelten Kokillen wurde nicht modelliert. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Behälterkonzepte zu ermöglichen, wurden die Abmessungen der Behälter so variiert, dass nach einer angenommenen Abklingzeit von 50 Jahren Dosisleistungen an den Seitenwänden erreicht werden, die denen der Konzepte POLLUX®-10 bzw. POLLUX®-9 entsprechen.

Eine Abschätzung der Strahlenexposition bei der Rückholung erfolgte für die Behälterkonzepte ENCON für Tonstein, Kristallin und Steinsalz. Da sich die Abschätzung einer Kollektivdosis aufgrund der vielen notwendigen Annahmen als schwierig erwies, wurden zwei Szenarien unterstellt. In Szenario 1 wurde angenommen, dass die Rückholung aller Endlagerbehälter 40 Jahre nach der Einlagerung erfolgt. Das Szenario beinhaltet implizit die Annahmen, dass sowohl die Einlagerungs- als auch die Rückholungsphase einen Zeitraum von ca. 40 Jahren abdecken, d. h. die Rückholung beginnt direkt nach Einlagerung des letzten Behälters. Dieses Szenario ähnelt somit dem in (Bollingerfehr u. a., 2012) und spiegelt einen „worst-case“ wieder. Szenario 2 unterstellt, dass lediglich ein kleiner Teil der Behälter direkt nach der Einlagerung des jeweiligen Behälters zurückgeholt werden muss und z. B. nach Reparatur wieder eingelagert werden kann.

In beiden Szenarien wird angenommen, dass die eigentliche Rückholung des Behälters 5 Tage dauert (Bollingerfehr u. a., 2012), wobei unterstellt wird, dass 24 Stunden am Tag gearbeitet wird. In diesem Zeitraum arbeiten die Beschäftigten in einem Abstand von 2 Metern oder mehr an der Vorderseite des Endlagerbehälters. Arbeitsschritte können ein Wiederauffahren der versetzten Strecken und der Transport an die Oberfläche beinhalten. Es wird angenommen, dass zusätzlich 4 Arbeitsstunden in der Nähe des Behälters (0,5 Meter Abstand zur Seitenwand, jeweils eine Stunde an den Positionen der Anschlagpunkte und zwei weitere Stunden an der Position mit der höchsten Dosisleistung) notwendig sind. Denkbare Tätigkeiten sind die Überprüfungen der physischen Integrität der Lastan-

schlagpunkte. Weiterhin wird angenommen, dass lediglich zwei Beschäftigte in der Nähe des Behälters arbeiten und sich alle weiteren Beschäftigten in hinreichend großer Entfernung mit vernachlässigbarer Dosisleistung aufhalten. Die Verwendung zusätzlicher mobiler Abschirmungen sowie die Strahlungsabschirmung durch z. B. Teilschnittmaschinen und verbleibendes Versatzmaterial werden nicht berücksichtigt.

Die Menge der einzulagernden Kokillen mit verglasten Spaltproduktlösungen und bestrahlten Brennelemente ist sehr gut bekannt. Mit den Annahmen zur Beladung der Endlagerbehälter ist eine vergleichsweise akkurate Angabe der Anzahl der rückzuziehenden Behälter möglich. Eine Inkorporation von Radionukliden wird nicht berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die Endlagerbehälter hinreichend intakt sind, dass keine Freisetzung von Radionukliden stattfindet und die Ingestion von Versatzmaterial (z. B. ^{24}Na , ^{36}Cl und ^{38}Cl , das durch Neutronenaktivierung von Steinsalz entsteht), vermieden werden kann.

Ergebnisse

POLLUX®-10. Für eine Beladung des POLLUX®-10 mit den bestrahlten UO_2 -Brennstäben mit einem Abbrand von 55 GWd/Mg SM und einer Zeit von 50 Jahren nach der Entnahme aus dem Reaktor wurde für weite Bereiche der Seitenwand eine Dosisleistung von $25 \mu\text{Sv h}^{-1}$ berechnet. In einigen Bereichen mit geringer Ausdehnung wurden Maximalwerte von $40 \mu\text{Sv h}^{-1}$ gefunden. Im Vergleich zu zweidimensionalen Rechnungen mit einem einfacheren Behältermodell in Spilker u. Hüggenberg (1991) wurde eine ca. 30 % höhere Neutronen-Dosisleistung ermittelt. Der Unterschied kann mit dem Wechsel der operativen Dosisgröße von H_{MADE} zu $H^*(10)$ begründet werden. Bei der Gamma-Dosisleistung wurde ein um den Faktor 4 höherer Wert bestimmt. Aufgrund der in der Arbeit von (Spilker u. Hüggenberg, 1991) dargestellten Änderung der Dosisleistung mit zunehmender Abklingzeit wird vermutet, dass hier die neutroneninduzierte Gammastrahlung, die einen überraschend großen Beitrag zur Dosisleistung liefert, nicht berücksichtigt wurde. Als Ursache der neutroneninduzierten Gammastrahlung wird die (durch die Aufteilung in einen inneren Behälter aus niedrig legiertem Stahl und einen äußeren aus Gusseisen notwendige) Positionierung der Moderatorstäbe relativ nahe an der Außenwand angesehen. Im Falle der Transport- und Lagerbehälter CASTOR® ist der Beitrag der neutroneninduzierten Gammastrahlung vernachlässigbar klein (eigene Rechnungen). Sowohl bei (Spilker u. Hüggenberg, 1991) als auch in den im Rahmen von ENTRIA durchgeführten Rechnungen dominiert der Beitrag der Neutronenstrahlung zur Dosisleistung.

Die neutroneninduzierte Gammastrahlung entsteht durch die Absorption moderierter Neutronen durch den Wasserstoff des Moderators und durch das Gusseisen. Dabei entsteht Gammastrahlung mit Energien bis zu 9 MeV, die schwierig abzuschirmen ist. Durch die Verwendung eines Neutronenmoderators mit einem kleinen Bor-Zusatz kann die Erzeugung der neutroneninduzierten Gammastrahlung stark verringert werden (Reduzierung der Dosisleistung an der Seitenwand des Endlagerbehälters um 14 %).

In den Datensätzen für DW-Reaktoren mit einem Abbrand von 55 Gwd/Mg SM in (Peiffer u. a., 2011) erkennt man, dass das Inventar des Radionuklids ^{244}Cm im bestrahlten MOX-Brennstoff etwa 10-mal so groß ist wie im bestrahlten UO_2 -Brennstoff. Im bestrahlten Brennstoff mit hohem Abbrand ist ^{244}Cm die dominierende Quelle für Neutronen. Ein POLLUX®-10, der mit den Brennstäben aus neun UO_2 und einem MOX-Brennelement beladen ist, stellt gegenüber einem nur mit UO_2 -Brennstäben beladenen Behälter eine doppelt so starke Neutronenquelle dar. Befinden sich die MOX-Brennstäbe möglichst zentral im POLLUX®-10, findet man eine vergleichsweise niedrige Erhöhung der Dosisleistung (+40 %) an der Seitenwand, aber eine vergleichsweise hohe im Mittelbereich der Vorder- und Rückseite. Eine solche gezielte Beladung des zentralen der fünf Tragekörbe des POLLUX®-10 mit MOX-Brennstäben ist somit vorteilhaft, wenn Arbeitsschritte bei der Einlagerung und der Rückholung erfordern, dass die Aufenthaltszeiten der Beschäftigten an der Seitenwand lang und vor bzw. hinter dem Behälter relativ kurz sind.

Der Neutronenmoderator Polyethylen (PE) hat bei hohen Temperaturen unvorteilhafte Eigenschaften. Bei ca. 140 °C findet eine starke Volumenausdehnung statt und bei der Kristallit-Schmelztemperatur von ca. 150 °C eine Phasenumwandlung (Klein, 2012; VDMA, 1979). Diese Temperaturen können im Wirtsgestein Steinsalz überschritten werden. Deshalb wurden Simulationen durchgeführt, um die Eignung anderer Materialien zu untersuchen. Die Verwendung von Titanhydrid (TiH_2) anstelle von PE führt zu kleineren Dosisleistungen an der Behälteroberfläche (-28 % an der Seitenwand). Allerdings ist TiH_2 erheblich teurer als PE. Außerdem führt die höhere Massendichte von Titanhydrid zu einer Erhöhung der Masse des Endlagerbehälters von 65 auf ca. 70 Tonnen. Polymere mit höherer thermischer Beständigkeit sind durch einen niedrigeren Wasserstoffgehalt gekennzeichnet. Simulationen mit z. B. PMMA ($(\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2)_n$, amorpher Thermoplast) und PA6 ($(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO})_n$, Absorption langsamer Neutronen durch die $^{14}\text{N}(\text{n},\text{p})$ -Reaktion) anstelle von PE ($(\text{CH}_2)_n$) führten zu höheren Dosisleistungen aufgrund der schlechteren Moderation der Neutronen.

Bei der Simulation mit veränderten Anordnungen des Neutronenmoderators erwiesen sich die Erhöhung der Anzahl der Moderatorstäbe im äußeren Ring auf 42 (Dosisleistung an der Seitenwand -8 %) bzw. die Vergrößerung der Durchmesser im äußeren Ring auf 95 mm (Dosisleistung an der Seitenwand -25 %) als vorteilhaft. Beide Methoden werden nach Kenntnisstand des Bearbeiters bei der Fertigung von Transport- und Lagerbehältern in Deutschland eingesetzt.

Es wurde festgestellt, dass Gusseisen aufgrund des hohen Graphitanteils besser als Neutronenmoderator wirkt als niedrig legierte Stähle. Diese Untersuchung führte zur Wahl von Gusseisen als Material für die generischen Behälterkonzepte (ENCON), die im IW entwickelt werden.

POLLUX-9. Ordnet man 9 HAW-Kokillen in einem Endlagerbehälter so an, dass jeweils 3 Kokillen auf drei Ebenen stehen, ist im Vergleich zum Konzept POLLUX®-10 eine Vergrößerung des Schachts notwendig. Um die Außenmaße entsprechend der Annahme in (Bollingerfehr, 2011) beibehalten zu können, wurden im inneren Behälter Aussparungen berücksichtigt. Die Reduzierung der Wanddicke führt zu Dosisleistungen von bis zu $1,8 \text{ mSv h}^{-1}$ an der Oberfläche und ca. $0,1 \text{ mSv h}^{-1}$ in einem Abstand von 2 Metern.

Eine Änderung der Außenmaße erwies sich als notwendig. Ein Endlagerbehälter mit vergleichbarer Wandstärke müsste einen größeren Durchmesser haben (1810 mm anstelle von 1560 mm), kann aber dafür kürzer sein (im finalen Modell 5012 mm anstelle von 5517 mm). Die Masse des beladenen Behälters ist mit 66 Tonnen nur geringfügig höher als die des POLLUX®-10. Für diesen Behälter wurde eine Dosisleistung an der Seitenwand ermittelt ($20 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$ bis $25 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$), die der für den POLLUX®-10 bei Beladung mit bestrahlten UO_2 -Brennelementen sehr ähnlich ist.

Bei der Simulation für den POLLUX-9 wurden hohe Dosisleistungen von $110 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$ an der Vorder- und Rückseite festgestellt. Diese lässt sich durch eine Erhöhung der Dicke der PE-Platte auf 80 mm an der Rückseite und eine zusätzliche, 40 mm dicke PE-Platte an der Vorderseite auf $20 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$ (Rückseite) und $10 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$ (Vorderseite) reduzieren. Durch die oben beschriebene Anordnung der HAW-Kokillen im Endlagerbehälter entstehen im Schacht Hohlräume mit einem Gesamtvolumen von ca. 1 m^3 . Durch Einsätze von Graphitblöcken ähnlich wie beim Transport- und Lagerbehälter CASTOR® HAW28M (GNS, 2014) kann eine positionsabhängige Reduzierung der Dosisleistung an der Seitenwand erreicht werden (im Mittel um -60 %). Die Graphitblöcke führen zu einer Erhöhung der Masse des Endlagerbehälters um ca. 2 Tonnen. Gemäß (Meleshyn u. Noseck, 2012) enthalten einige der HAW-Kokillen erheblich mehr ^{241}Am

und ^{244}Cm als von (Peiffer u. a., 2011) berechnet. Diese Radionuklide sind durch (α ,n)-Reaktionen im Borosilikatglas die dominanten Neutronenquellen in den HAW-Kokillen. Durch Graphiteinsätze ist eine Verbesserung der Neutronenmoderation ohne gravierende Veränderung des Behälterdesigns möglich. Die Ergebnisse der Simulationen der Endlagerbehälter POLLUX®-10 und POLLUX®-9 sind im Detail in (Pönitz u. a., 2017) beschrieben.

ENCON. Die Behälterkonzepte unterscheiden sich sowohl durch die Materialien als auch ihre Anordnung (ENCON-TS: Gusseisen mit Moderatorstäben innen und niedrig legierter Stahl außen, ENCON-K: Gusseisen mit Moderatorstäben innen und Kupfer außen, ENCON-S: niedrig legierter Stahl innen und Gusseisen außen). In den Simulationen sind kleine Unterschiede in den Abschirmungseigenschaften erkennbar. Z. B. ist der Anteil der neutroneninduzierten Gammastrahlung bei den Behälterkonzepten, bei denen sich die Moderatorstäbe im inneren Behälter befinden, vernachlässigbar klein. Eine Anordnung der Moderatorstäbe im äußeren Behälter bewirkt jedoch eine bessere Neutronenmoderation. Kupfer hat gegenüber Gusseisen und Stahl eine etwas höhere Massendichte, die generell eine vorteilhafte Eigenschaft eines Abschirmmaterials ist. Überraschenderweise bewirkt Kupfer eine geringfügig bessere Neutronenmoderation als Eisen. Alle Behälterkonzepte bewirken eine Reduzierung der Gammastrahlung der Spalt- und Aktivierungsprodukte um viele (etwa 7 bis 8) und der Neutronenstrahlung um 2 bis 3 Größenordnungen. Der Vergleich der Behälterkonzepte für 3 HAW-Kokillen zeigt bei vergleichbarer Dosisleistung nur geringe Unterschiede in den Wanddicken (Durchmesser der Behälter: ENCON-TS: 130 cm, ENCON-K: 126 cm, ENCON-S: 128 cm). Da der Außenbehälter des ENCON-S aus Gusseisen besteht und dieses Material eine etwas niedrigere Dichte hat als Stahl und Kupfer, ist die Masse des Endlagerbehälters für Salz etwas leichter (35 Mg) als die der Behälter für Tonstein (39 Mg) und Kristallin (37 Mg).

Im Vergleich zu den Simulationen für den POLLUX®-10 und POLLUX®-9 zeigen alle ENCON-Behälter sowohl für bestrahlte Brennstäbe als auch HAW-Kokillen sehr niedrige Dosisleistungen an Vorder- und Rückseite. Neben einer besseren Neutronenabschirmung an der Deckelseite (PE-Platte anstelle bzw. zusätzlich zur Graphit-Platte des POLLUX®) und einem Geometrieeffekt (die Modellierung für verschiedene Beladungen deutet an, dass die Dosisleistung an der Deckelseite mit steigendem Schachtdurchmesser tendenziell zunimmt) bewirken auch die Tragpilze eine zusätzliche Strahlungsabschirmung. Niedrige Dosisleistungen an Vorder- und Rückseite sind vorteilhaft, wenn sich Beschäftigte überwie-

Tabelle 5.1: Abschätzung der Kollektivdosis für zwei Szenarien für die Rückholung aus einem Endlager in Tonstein.

Szenario	Beschreibung	Kollektivdosis in Personen mSv
1: Rückholung aller 6.545 Behälter 40 Jahre nach Einlagerung	100 % UO_2 , $t = 115$ a 90 % UO_2 , 10 % MOX, $t = 135$ a	280 300
2: Rückholung von 0,1 % der Behälter kurz nach der Einlagerung	100 % UO_2 , $t = 75$ a 90 % UO_2 , 10 % MOX, $t = 95$ a	0,47 0,46

gend vor oder hinter dem Endlagerbehälter aufhalten, z.B. wenn das Rückholungskonzept das Wiederauffahren der versetzten Strecken vorsieht.

Im Gegensatz zu den ENCON für Ton/Tonstein und Kristallin, die an Vorder- und Rückseite Tragpilze als Lastanschlagpunkte besitzen, ist für den ENCON für Steinsalz (ENCON-S) an der Vorderseite eine ringförmige Struktur in der Seitenwand vorgesehen. Der Tragpilz an der Rückseite kann sich als problematisch erweisen, wenn das Einsetzen der Moderatorstäbe an dieser Seite erfolgen muss. Ggf. ist an beiden Seiten ein ringförmiger Lastanschlagpunkt notwendig, auch wenn dadurch der Vorteil der zusätzlichen Strahlungsabschirmung durch den Tragpilz verloren geht.

Rückholung aus Tonstein. Für die Einlagerung in Tonstein werden 1.245 Endlagerbehälter für HAW-Kokillen und 5.300 Behälter für bestrahlte Brennelemente benötigt. Für Szenario 2 wird die Rückholung von 1 bzw. 6 Behältern angenommen. Wenn man annimmt, dass die Wärmeentwicklung der Endlagerbehälter für bestrahlte Brennelemente die Zwischenlagerzeit bestimmt, erfolgt eine Einlagerung bei einer Beladung mit 100 % UO_2 -Brennstäben nach einer Abklingzeit von $t = 115$ Jahren für Szenario 1 und $t = 75$ Jahren für Szenario 2. Bei einer Beladung mit 90 % UO_2 - und 10 % MOX-Brennstäben betragen die Abklingzeiten $t = 135$ Jahren für Szenario 1 und $t = 95$ Jahren für Szenario 2. Für die Behälter mit HAW-Kokillen wird die gleiche Abklingzeit (Zeit nach Herstellung der Kokille) angenommen. Die Abschätzung der Kollektivdosen für eine Rückholung aus Tonstein ist in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Abschätzung der Kollektivdosis für zwei Szenarien für die Rückholung aus einem Endlager in Kristallingestein.

Szenario	Beschreibung	Kollektivdosis in Personen mSv
1: Rückholung aller 5.445 Behälter 40 Jahre nach Einlagerung	100 % UO_2 , $t = 120$ a	140
	90 % UO_2 , 10 % MOX, $t = 140$ a	140
2: Rückholung von 0,1 % der Behälter kurz nach der Einlagerung	100 % UO_2 , $t = 80$ a	0,28
	90 % UO_2 , 10 % MOX, $t = 100$ a	0,26

Rückholung aus Kristallingestein. Durch die gleiche Beladung der Behälter mit 3 Kokillen wird die gleiche Anzahl von 1.245 Endlagerbehältern für HAW-Kokillen benötigt. Die Anzahl der Behälter für bestrahlte Brennstäbe ist durch die höhere Beladung kleiner (4.240 Endlagerbehälter). Für Szenario 2 wird die Rückholung von 1 bzw. 5 Behältern angenommen. Die Abklingzeit für Behälter mit UO_2 -Brennstäben beträgt (unter den gleichen Annahmen wie bei Tonstein) $t = 120$ Jahre für Szenario 1 und $t = 80$ Jahre für Szenario 2. Auch hier erfordert die Beladung mit 90 % UO_2 - und 10 % MOX-Brennstäben eine Verlängerung der Zwischenlagerzeit um jeweils 20 Jahre. Die Abschätzung der Kollektivdosen für eine Rückholung aus Kristallingestein ist in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Rückholung aus Steinsalz. Für das Wirtsgestein Steinsalz wird die gleiche Anzahl von 1.245 Behältern für HAW-Kokillen und – verglichen mit Tonstein – halb so viele Behälter für bestrahlte Brennstäbe (2.650) benötigt. Für Szenario 1 wird eine Abklingzeit von $t = 115$ Jahren (135 Jahren) für 100 % UO_2 (90 % UO_2 und 10 % MOX) angenommen. Szenario 2 existiert in Steinsalz nicht. Im Safety Case haben nach dem gegenwärtigen Stand die geologische und geotechnische Barriere (Steinsalz als Wirtsgestein und Versatzmaterial) die Aufgabe, die Radionuklide einzuschließen (Minhans u. a., 2008). Vom Behälter als technische Barriere wird kein Kredit genommen. Eine Rückholung der Behälter ist aus Sicht des Strahlenschutzes nicht gerechtfertigt. Kollektivdosen für Szenario 2 werden lediglich zum Vergleich angegeben. Für Szenario 2 wird die Rückholung von 1 bzw. 3 Behältern angenommen. Wie beim Tonstein wird eine Abklingzeit $t = 75$ Jahre ($t = 95$ Jahre) für 100 % UO_2 (90 % UO_2 und 10 % MOX) angenommen. Die Ergebnisse für Steinsalz sind in Tabelle 5.3 angegeben.

Tabelle 5.3: Abschätzung der Kollektivdosis für zwei Szenarien für die Rückholung aus einem Endlager in Steinsalz.

Szenario	Beschreibung	Kollektivdosis in Personen mSv
1: Rückholung aller 3.895 Behälter 40 Jahre nach Einlagerung	100 % UO ₂ , t = 115 a	110
	90 % UO ₂ , 10 % MOX, t = 135 a	110
2: Rückholung von 0,1 % der Behälter kurz nach der Einlagerung	100 % UO ₂ , t = 75 a	0,20
	90 % UO ₂ , 10 % MOX, t = 95 a	0,18

Einordnung der Ergebnisse

Für die Dosisleistung an der Oberfläche der Endlagerbehälter wurden im Allgemeinen Werte von einigen zehn $\mu\text{Sv h}^{-1}$ gefunden. Diese Werte sind im Vergleich zu Messungen an Transport- und Lagerbehältern, z. B. in (Börsch u. a., 2000), recht niedrig. Eine wichtige Ursache ist die in den Rechnungen angenommene Abklingzeit von 50 Jahren, die deutlich größer ist als die Abklingzeiten von wenigen Jahren in (Börsch u. a., 2000).

Für das Konzept eines Endlagerbehälters für 9 HAW-Kokillen (POLLUX-9) war eine Vergrößerung des Behälterdurchmessers um 25 cm erforderlich. Die Konsequenzen für die Auslegung des Endlagers, z. B. durch eine ggf. erforderliche größere Dimensionierung der Streckenquerschnitte, kann im Rahmen des AP 4.2 nicht eingeschätzt werden.

Für alle Wirtsgesteine führt das Szenario 1 zu einer Kollektivdosis, die ca. 500- bis 650-mal so groß ist wie die des Szenarios 2. Der Faktor setzt sich zusammen aus der unterschiedlichen Anzahl der rückzuholenden Behälter (alle im Vergleich zu 0,1 %) und der Verringerung der Dosisleistung aufgrund der längeren Abklingzeit. Die Kollektivdosen zeigen somit auch die starke Abhängigkeit des unterstellten Szenarios.

Kollektivdosen von 100 bis 300 Personen-Millisievert erscheinen groß im Vergleich zum Grenzwert der effektiven Dosis von 20 Millisievert im Kalenderjahr für beruflich strahlenexponierte Personen (§55 StrlSchV). Da die Rückholung ein Vorgang ist, der sich über einen Zeitrahmen von mehreren Jahrzehnten hinzieht, sollte dieser Wert eher mit der Berufslebensdosis von 400 mSv verglichen werden (§56 StrlSchV).

Vergleicht man die Ergebnisse für verschiedene Wirtsgesteine, erkennt man eine Abhängigkeit der Kollektivdosis bei beiden Szenarien von der Anzahl der Endlagerbehälter. Die vergleichsweise niedrigen Werte für das

Wirtsgestein Kristallin sind zum Teil auf die etwas größere Abklingzeit, zum Teil aber auch auf die willkürliche Festlegung, dass die Dosisleistung an der Oberfläche für alle Behälter nach einer Abklingzeit von 50 Jahren ähnlich sein soll, zurückzuführen.

5.4.3 Individuelle Dosimetrie für Beschäftigte in Entsorgungsanlagen

Im Arbeitspaket „Individuelle Dosimetrie für Beschäftigte in Entsorgungsanlagen“ wurden individuelle Dosisbelastungen für das Personal für die Entsorgungsoptionen Endlagerung und Tiefenlagerung mit Vorkehrungen für Überwachung und Rückholbarkeit ermittelt. Damit werden Grundlagen für einen systematischen Vergleich der Risiken für das Personal bei diesen beiden Entsorgungsoptionen ermöglicht.

Ausgangslage

Die Ausgangslage gleicht derjenigen für das Arbeitspaket „Vergleich der radiologischen Gefährdung für verschiedene Entsorgungsoptionen“. Die zuvor bereits erwähnten detaillierten und gut dokumentierten Datensätze für das Radionuklidinventar der bestrahlten Brennelemente und HAW-Kokillen (Peiffer u. a., 2011) bilden auch eine Grundlage für das vorliegende Arbeitspaket.

Untersuchungsschwerpunkte und Ergebnisse

Das Arbeitspaket sollte realitätsnahe Bewertungen von Strahlenfeldern in Einrichtungen für die untersuchten Entsorgungsoptionen ermöglichen. Monte-Carlo-Methoden bieten eine Alternative zu traditionellen Methoden zur Abschätzung von Dosisbelastungen. Die numerische Simulation von Strahlenfeldern in Tiefenlagern für hoch radioaktive Abfälle und die Beschreibung von Beschäftigungsabläufen mit Hilfe von Ablaufsimulationen und MCNP-Modellierungen erlauben die Abschätzung von Strahlenexpositionen für bestimmte Tätigkeitsabläufe und damit der individuellen Dosisbelastung. Im Arbeitspaket wurde eine Methodik entwickelt, um die Dosis des Personals bei der Einlagerung von Behältern mit ausgedienten Brennelementen in Tiefenlagern in Ton / Tonstein und in Steinsalz abzuschätzen.

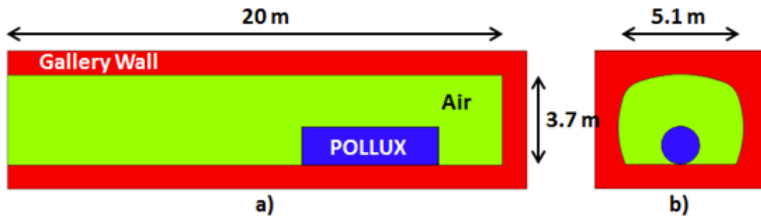


Abbildung 5.2: Modell für die verwendete Einlagerungsstrecke mit einem POLLUX®-10-Tiefenlagerbehälter: a) Seitenansicht, b) Vorderansicht.

Randbedingungen zur Abschätzung von Dosisbelastungen

Bestimmte Arbeitsszenarien in Tiefenlagern für wärmeentwickelnde Abfälle können zu einer erhöhten Strahlenbelastung für die dort Beschäftigten führen. Daher sind realistische Abschätzungen der Personendosis bei individuellen Arbeitsszenarien erwünscht. Dazu wurde in diesem Arbeitspaket die Entwicklung einer Methodik („Tools“) zur individuellen Dosimetrie zur Abschätzung der Dosis mit Monte-Carlo-Simulationen entwickelt. Grundlage zur Untersuchung von Einstellungsszenarien war das bestehende Konzept von POLLUX® in Steinsalz (Janberg u. Spilker, 1998). Die vorgenommene Untersuchung von Arbeitsszenarien für die Einlagerung von POLLUX®-10-Behältern basiert auf dem Konzept von DBE TECHNOLOGY GmbH (Filbert u. a., 1995).

Die verwendeten geometrischen Parameter für die generischen Einlagerungsbereiche in den Wirtsgesteinen Ton / Tonstein und Steinsalz stammen aus dem Referenzkonzepten des ENTRIA-Arbeitspakets 6.4 (Stahlmann u. a., 2015). Anhand dieser Daten wurden Modelle für Einlagerungsstrecken in Steinsalz und Tonstein generiert. Die Streckendimensionen betragen 20 m Länge, 3,7 m Höhe und 5,1 m Breite (siehe Abb. 5.2). Die Entfernung zwischen POLLUX® und dem Endpunkt der Galerie beträgt 2,63 m. Für die Wandstärke der Einlagerungsstrecke wurde eine Dicke von 1 m gewählt, so dass Streu- und Absorptionsprozesse der auftretenden Strahlung hinreichend genau berücksichtigt werden. Bei Ton / Tonstein wurde entsprechend des Ausbaus Beton als Wandmaterial eingesetzt.

Das Abfallinventar für den POLLUX®-10-Behälter wurde anhand des Berichts von (Peiffer u. a., 2011) erstellt. Der Abbrand wurde mit 55 GWd/tHM veranschlagt, wobei ein Verhältnis von 90% UOX und 10% MOX für die Brennelemente angenommen wurde. Als Abklingzeit nach dem Entladen aus dem Reaktor wurde ein Zeitraum von 50 Jahren ge-

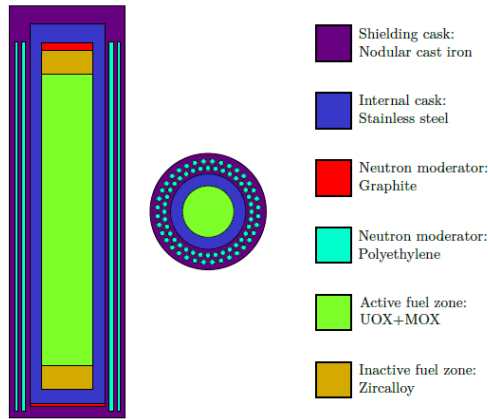


Abbildung 5.3: Modell des vereinfachten POLLUX®-10-Tiefenlagerbehälters.

wählt. Vorbild für die Modellierung ist das geometrische Layout nach (Janberg u. Spilker, 1998). Für das verwendete Modell des Behälters (Abb. 5.3) wurden weiterhin folgende Vereinfachungen gewählt: es wurde für den Brennstabbereich eine homogene Mischung mit einer effektiven Dichte von $3,23 \text{ g/cm}^3$ aus Spaltungs- und Aktivierungsprodukte, Hüllrohrmaterial (Zircalloy) und Zwischenräume zwischen den Brennstäben angenommen. Tragezapfen wurden weggelassen und eine glatte Oberflächenstruktur angenommen.

Strahlenfeld in der Einlagerungsstrecke

Zunächst wurden drei dieser POLLUX®-10-Modelle in eine Einlagerungsstrecke in Steinsalz gemäß Abb. 5.4 platziert. Daraufhin wurden MCNP6-Simulationen (Pelowitz u. a., 2013) zum Strahlenfeld, sowohl mit Steinsalzwänden als auch für frei in der Luft, durchgeführt. Abb. 5.4 zeigt auch den Einfluss der umgebenden Wände auf die Dosisleistung für Neutronenstrahlung. Rückgestreute Neutronen ergeben insbesondere mit zunehmendem Abstand von den Einlagerungsbehältern einen Unterschied in der Dosisleistungsverteilung.

Details zur Zusammensetzung des Strahlenfeldes werden in Abb. 5.5, diesmal für MCNP6-Simulationen mit nur einem POLLUX®-10-Tiefenlagerbehälter, deutlich. In dieser Abbildung sind die Beiträge von verschiedenen Strahlungskomponenten, die zur Umgebungs-Äquivalentdo-

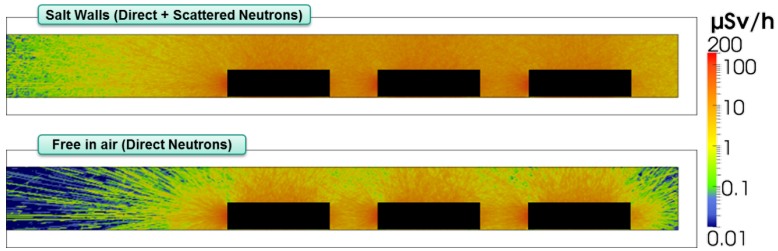


Abbildung 5.4: Verteilung der Neutronen-Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10)$ um drei POLLUX®-10-Tiefenlagerbehälter.

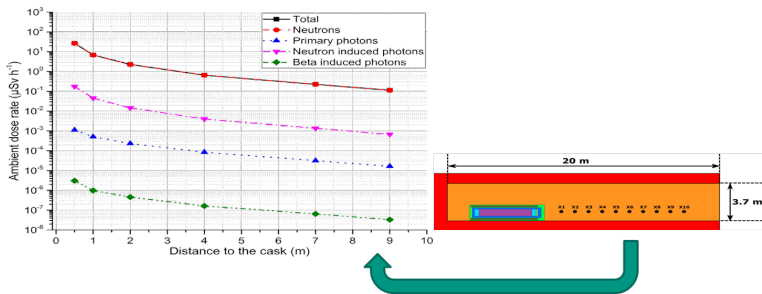


Abbildung 5.5: Anteile der verschiedenen Strahlungskomponenten zu Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10)$ für einen POLLUX®-10-Tiefenlagerbehälter in einer Einlagerungsstrecke.

sis $\dot{H}^*(10)$ beitragen, in Abhängigkeit vom Abstand zum POLLUX®-10-Behälter dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Neutronen den Hauptbeitrag zur Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10)$ leisten.

Wie verhält sich die Umgebungs-Äquivalentdosisleistung für $\dot{H}^*(10)$ bei verschiedenen Gesteinsarten? Die Antwort wird in Abb. 5.6 gegeben. Diesmal ist die Abstandsabhängigkeit von $\dot{H}^*(10)$ für Neutronen mit nur einem POLLUX®-10-Tiefenlagerbehälter für die Wirtsgesteine Steinsalz und Ton / Tonstein (Beton) sowie für frei in der Luft aufgetragen.

Die höhere Rückstreuung im Steinsalz führt zu höheren Dosisleistungswerten; beim Ton / Tonstein reduzieren Wechselwirkungen mit den Ausbau aus Beton die Dosisleistung, so dass die Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10)$ zwischen den Werten für Steinsalz und für frei in der

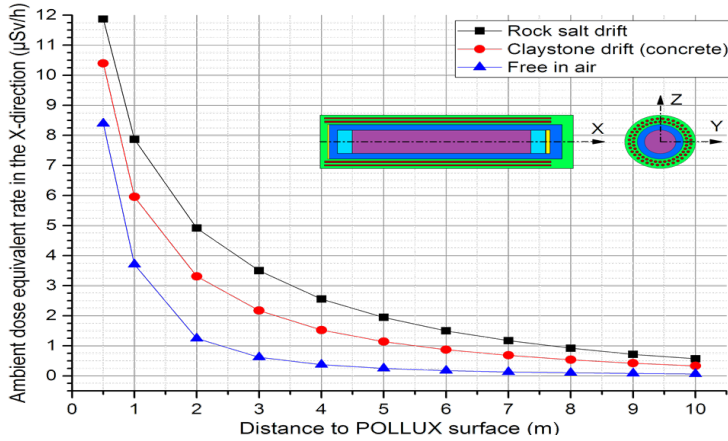


Abbildung 5.6: $\dot{H}^*(10)$ für Neutronen für einen POLLUX®-10-Tiefenlagerbehälter bei verschiedenen Umgebungsparametern.

Luft liegen. Hinsichtlich der Strahlenexposition wäre, den bisherigen Erkenntnissen zufolge, Ton / Tonstein als Wirtsgestein als vorteilhafter anzusehen.

Experimente mit einem Neutronengenerator

Bevor weitergehende Untersuchungen zur Strahlenexposition bei bestimmten Tätigkeitsabläufen in Tiefenlagern durchgeführt wurden, wurden Experimente mit dem Neutronengenerator (Klix u. a., 2011) der TU Dresden am Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR) durchgeführt. Durch Vergleiche zwischen Experimenten und entsprechenden Simulationen wurde eine Überprüfung der ausgewählten Werkzeuge bzw. Methodik gewährleistet. Im Labormaßstab wurde verifiziert, ob MCNP6 in der Lage ist die Experimente geeignet zu reproduzieren. Der Neutronengenerator der TU Dresden besteht aus einem kompakten Linearbeschleuniger, welcher Deuteriumionen mit Energien von 300 kV und Strahlströmen von 10 mA liefert.

Die Neutronenerzeugung wird durch Fusionsreaktionen von Wasserstoffisotopen realisiert, indem der Deuteriumstrahl entweder auf ein Deuterium- oder Tritiumtarget gelenkt wird. Bei der Fusion von Deuterium ($D + D$) werden ^3He -Ionen und Neutronen mit einer kinetischen Energie von 2,5 MeV gebildet. Die Fusion von Deuterium und Tritium ($D + T$) führt zur Bildung von ^4He und Neutronen mit einer kinetischen Ener-

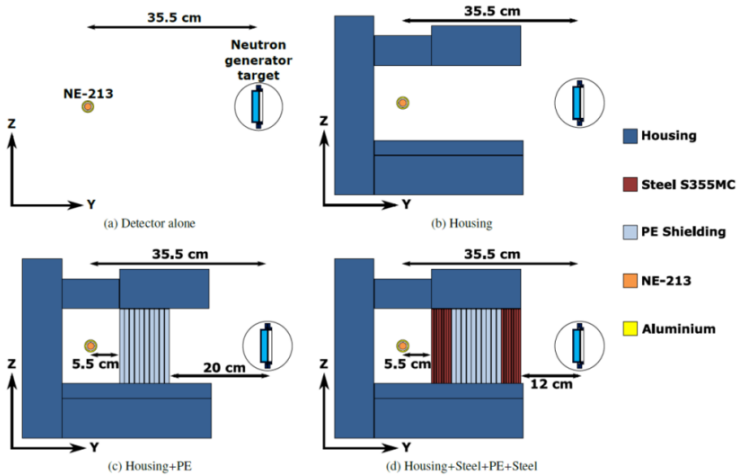


Abbildung 5.7: Konfigurationen (MCNP6-Modelle) zur Untersuchung des Abschirmverhaltens von „vereinfachten Tiefenlagerbehältern“.

gie von 14 MeV. Um die von abgebrannten Brennelementen generierten Neutronen experimentell zu simulieren, wurde schließlich die von Produktion von 2,5 MeV-Neutronen ausgewählt, da diese energetisch besser zum POLLUX®-Szenario passen. Dabei können Neutronenproduktionsraten von bis zu 1010 n/s erreicht werden.

Zur Messung der Neutronen- und Gammastrahlung wurde ein NE-213-Detektor eingesetzt. Um Abschirmungsbehälter vereinfacht zu repräsentieren, wurden Polyethylen- und Stahlschichten zwischen das Neutronengeneratortarget und den Detektor positioniert.

Schließlich wurden vier experimentelle Konfigurationen zusammengestellt und die entsprechenden Modellkonfigurationen für die Simulationen erstellt (Abb. 5.7): zuerst wurde der NE-213-Detektor zum Nachweis von Neutronen und Photonen frei in Luft positioniert (a), dann folgte ein Aufbau mit „Polyethylen-Haus“ um den Detektor (b), gefolgt von einer zusätzlichen Polyethylenschicht zwischen Target und Detektor (c) sowie schließlich eine Ergänzung durch Stahlplatten (d).

In Abb. 5.8 sind die zugehörigen experimentellen Resultate und Simulationsergebnisse für Neutronen dargestellt. Es werden Spektren der Neutronenfluenz verglichen, da diese sensitiver für energieabhängige Effekte sind als Werte für die integrale Fluenz. Insgesamt zeigen die Ergebnisse

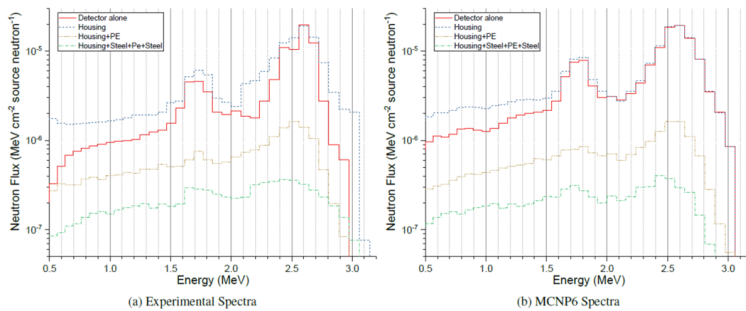


Abbildung 5.8: Neutronenfluenzspektren: experimentelle und simulierte Ergebnisse zu vier unterschiedlichen Konfigurationen.

der Messungen und entsprechenden Simulationen eine gute Übereinstimmung. Somit wurde bestätigt, dass die Vorgehensweise zu MCNP6-Simulationen für POLLUX®-ähnliche Abschirmszenarien geeignet ist, um weitergehende Szenarien in einem solchen Umfeld zu verwirklichen.

Strahlenexposition bei bestimmten Tätigkeitsabläufen

Aufbauend auf dem Vergleich der numerischen Simulationen mit den Messungen am Neutronengenerator wurde die Strahlenexposition für bestimmte Tätigkeitsabläufe bei der Einlagerung von Behältern mit ausgedienten Brennelementen in Tiefenlagern untersucht, wobei etwa die gleiche Menge von Abfällen in Steinsalz und Ton / Tonstein eingelagert werden soll. Dabei war die Grenze für die thermische Belastung des Wirtsgesteins zu berücksichtigen (Léon Vargas u. Stahlmann, 2016), die die maximale Beladung des Tiefenlagerbehälters bestimmt. Als Resultat war für die hier untersuchten Bedingungen in Steinsalz eine Beladung mit zehn Brennelementen realisierbar, während in Ton / Tonstein maximal drei Brennelemente pro Behälter in Frage kamen. Im Folgenden wurde bei den Simulationen für Steinsalz die Einlagerung von einem POLLUX®-10-Behälter mit 9 UOX und 1 MOX entsprechend 5,45 tHM (nachfolgend mit „ROCK-10“ bezeichnet) betrachtet; beim entsprechenden Tonsteinszenario wurden ein POLLUX®-10-Behälter mit 2 UOX und 1 MOX mit einer Masse von 1,64 tHM (Kurzbezeichnung „CLAY-3M“) sowie 2 POLLUX® mit 3 UOX, mit insgesamt 3,28 tHM, („CLAY-3U“) untersucht. Es wurde also in etwa der Inhalt von ROCK-10- auf drei CLAY-3-Behälter verteilt.

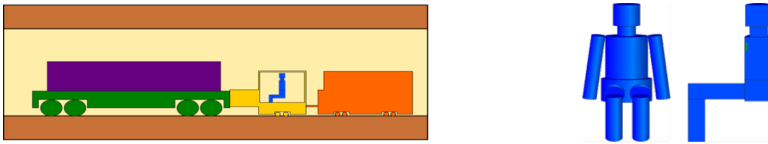


Abbildung 5.9: Positionierung eines BOMAB-Phantoms bei der Modellierung der Teilschritte. Ein sitzendes Phantom (blau, rechts vergrößert) befindet sich im Ensemble Kabine/Führerstand (gelb) und Lokomotive (orange) und POLLUX (violett) auf Transportwagen (grün).

Die Beschreibung bzw. Modellierung von Szenarien für die Einlagerung eines Behälters folgte dem o. g. Einlagerungskonzept von DBE TECHNOLOGY GmbH anhand ausgesuchter Arbeitsschritte aus Szenarien, die sich an einem dankenswerterweise von DBE TECHNOLOGY GmbH zur Verfügung gestellten Video orientieren. Untersucht wurden die vier Teilschritte Transport, Einfahren in die Einlagerungsvorrichtung, Platzieren des Behälters und Verfahren/Zurücksetzen.

In Abb. 5.9 sind Details zur Modellierung eines Arbeiters (repräsentiert durch ein BOMAB-Phantom; (U.S. Department of Energy, 2015)) im Lokomotiven-Führerstand dargestellt. Der Arbeiter wird als sitzendes Phantom in der Kabine des Ensembles aus POLLUX-Transportwagen, Kabine und Lokomotive operationalisiert. Durch Implementierung des Phantoms konnten Personendosisleistungen berechnet werden.

Mit diesen Szenarien wurde nun die Einlagerung o. g. gleicher Menge ausgedienter Brennelemente in Steinsalz und Ton / Tonstein simuliert. Die Ergebnisse zur Personendosisleistung für die vier untersuchten Teilschritte sind für die verschiedenen Behälterbeladungen ROCK-10, CLAY-3M und CLAY-3U in Abb. 5.10 dargestellt.

Ein Vergleich der Tiefen-Personendosisleistung $\dot{H}_p(10)$ zeigt, dass in den hier untersuchten Szenarien eine Einlagerung in Ton / Tonstein zu einer höheren Dosisleistung führen würde. Da die integrale Dosis von der Dauer der Teilschritte abhängt, ist nachfolgend ein hypothetisches Beispiel gegeben. Für den Transport wird eine Entfernung von einem Kilometer angenommen und die Fahrgeschwindigkeit des Transportensembles soll fünf Kilometer pro Stunde betragen. Für die Szenarien Einfahren in die Einlagerungsvorrichtung, Platzieren des Behälters und Verfahren der Einlagerungsvorrichtung wurde jeweils ein Zeitraum zehn Minuten veranschlagt.



Abbildung 5.10: Tiefen-Personendosisleistung $\dot{H}_p(10)$ für vier untersuchten Teilschritte für die Behälterbeladungen ROCK-10, CLAY-3M und CLAY-3U.

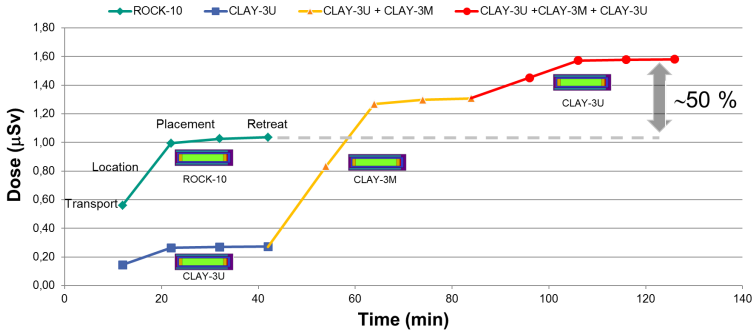


Abbildung 5.11: Beispielhafte Dosisentwicklung bei den untersuchten Teilschritten für Einlagerung der Behälterbeladungen ROCK-10 (grün), CLAY-3U (blau und rote) und CLAY-3M (gelb).

Das Ergebnis ist in Abb. 5.11 aufgetragen. Im ROCK-10-Szenario summieren sich die Dosen der Teilschritte Transport, Einfahren in die Einlagerungsvorrichtung, Platzieren des Behälters und Verfahren der Einlagerungsvorrichtung auf schließlich etwas mehr als ein Mikrosievert. In Ton / Tonstein werden anstelle des ROCK-10 drei Behälter, zwei CLAY-3U und ein CLAY-3M, eingebracht. Bei Einlagern des ersten CLAY-3U liegt die Dosis mit etwa 0,3 Mikrosievert noch unter dem Wert vom Steinsalz-Szenario. Mit dem im nächsten Schritt stärker strahlenden Behälter CLAY-3M wird mit 1,3 Mikrosievert bereits die Gesamtdosis vom ROCK-10-Szenario überschritten. Zum Schluss kommt noch die Dosis bei der Einlagerung des weiteren CLAY-3U hinzu, so dass eine Dosis von fast 1,6 Mikrosievert erreicht wird. Somit ist in diesen untersuchten Szenarien die Gesamtdosis bei einer Einlagerung in Ton / Tonstein um etwa 50 % höher als für Steinsalz.

5.4.4 Radionuklidquellterme für verschiedene Entsorgungsoptionen

Im Arbeitspaket „Radionuklidquellterme für verschiedene Entsorgungsoptionen“ wurden die Radionuklidquellterme für die drei Entsorgungsoptionen sowie die Radionuklidmobilisierung im Nahfeld berechnet. Diese Arbeiten stellen eine Grundlage für weitere Arbeiten zur vergleichenden Quantifizierung der Risiken, die sich mit diesen Entsorgungsoptionen verbinden, dar.

Ausgangslage

Die Beurteilung der (Langzeit)sicherheit des Endlagersystems erfordert eine Bewertung der Radionuklidfreisetzung und -mobilisierung. Quantitative Indikatoren hierfür sind primäre Radionuklidquellterme, d. h. die Menge bzw. die Konzentration an gelöster Radionuklidspezies unmittelbar an der Abfallquelle.

Untersuchungsschwerpunkte und Ergebnisse

Die generischen ENTRIA-Konzepte zur Tiefenlagerung mit bzw. ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit der Abfallprodukte sehen vor, dass die hoch radioaktiven Abfälle in Einlagerungsbereiche in Ton / Tonstein oder Steinsalz eingelagert werden. Im vorliegenden Arbeitspaket wurden die Einlagerung ausgedienter Brennelemente in Lagerbehältern aus metallischem Eisen (Gusseisen und / oder Edelstahl) und eine potentielle

Freisetzung von Radionukliden aus den Endlagergebinden betrachtet und auf Grundlage geochemischer Methoden quantifiziert. Eine Grundvoraussetzung für die Bewertung der Radionuklidfreisetzung war die Annahme eines Wasserkontakts mit dem abgebrannten Kernbrennstoff. Als Szenario wurden hierbei ein Wasserzutritt in die Einlagerungsbereiche, die Korrosion der Abfallbehälter und Korrosion des Kernbrennstoffs sowie eine anschließende Radionuklidfreisetzung aus der Abfallmatrix und dem (korrodierten) Behälter angenommen. Diese Prozesse führen letztlich zum Übergang von Radionukliden in die Lösung, welche dann aus dem Nahbereich der Abfälle ausgetragen werden können.

Generische geochemische Randbedingungen

Für eine Abschätzung der Radionuklidmobilisierung anhand von Radionuklidquelltermen ist die Kenntnis der geochemischen (Lösungs-)Bedingungen im Nahbereich der Abfälle essentiell notwendig. Zu den wesentlichen die geochemischen Bedingungen charakterisierenden Parametern gehören die Konzentration an gelösten Mineralsalzen (insbesondere NaCl, MgCl_2 , CaCl_2), der pHm-Wert (negativ dekadischer Logarithmus der Protonenkonzentration), die Konzentration an relevanten Liganden welche die Löslichkeit von Radionukliden signifikant beeinflussen (neben Hydroxid z. B. Carbonat), sowie das Redoxpotential Eh bzw. $p_e = 16.9 \cdot \text{Eh}$ bei 25°C. Die geochemischen Eigenschaften von potentiell zu den Abfällen zutretenden wässrigen Lösungen sind letztlich durch Wechselwirkung und Äquilibrierung mit den vorliegenden reaktiven Bestandteilen bzw. Materialien bestimmt. Zu letzteren zählen insbesondere das Wirtsgestein mit seinen mineralischen Haupt- und Nebenbestandteilen, die eisenhaltigen Abfallbehälter, Versatzmaterialien (z. B. Salzgrus, Bentonit) sowie Portlandzement- oder Sorelzement-haltige Verbindungen (Betonwände, Widerlager, Dammbauwerke etc.). Für die in ENTRIA betrachteten generischen Konzepte (Stahlmann u. a., 2015) wurden geochemische Randbedingungen vereinfachend und orientierend abgeschätzt, was im Folgenden näher ausgeführt ist.

Für die Tiefenlagerung in Salzformationen wurden zwei generische Salzlösungen unterschieden, nämlich pHm-neutrale NaCl-dominierte Lösung und MgCl_2 -dominierte Lösung, wie sie bezüglich der Hauptkomponenten in Salzformationen in flacher und steiler Lagerung in Deutschland grundsätzlich auftreten können. Zur Einschätzung der Lösungseigenschaften von Ton- / Tonstein-Formationen wurden zwei unterschiedliche Fälle betrachtet: solche mit niedrig salinaren Porenwässern, wie sie z. B. für süddeutschen Opalinuston charakteristisch sind, und solche mit

hoch salinaren Porenwässern, wie sie z. B. für norddeutsche Unterkreide-Formationen kennzeichnend werden. Die hier generisch definierten Lösungszusammensetzungen orientieren sich an geologischen Untersuchungen zu Opalinuston-Formationen bzw. das im Schacht Konrad anstehende Wirtsgestein, (vgl. z. B. Bradbury u. a. (1998); Brewitz (1982)).

Im Falle der MgCl_2 -dominierten Lösung wurde ein schwach alkalischer pHm-Wert von 9 angenommen, wie er beispielsweise durch ein Gleichgewicht von MgCl_2 -dominierter Lösung mit Brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s})$) basierten Materialien zustande kommt. Für die anderen Fälle wurden zwei pH-Werte unterschieden. Neben pHm-nahe-neutraler Lösung ($\text{pHm} \approx 7\text{--}8$) wurde jeweils ein stark alkalischer Fall betrachtet, wie er durch Wechselwirkung der ursprünglichen pHm-nahe-neutralen Lösung mit den alkalischen Bestandteilen von Portlandzement entstehen kann. In der vorliegenden Arbeit wurde der alkalische pHm-Wert vereinfachend durch Unterstellung eines Gleichgewichts mit Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s})$) abgeschätzt, und liegt im Bereich $\text{pHm} \approx 12.5$. Als Folge wurde für die alkalischen Lösungen ein im Vergleich zu den neutralen Lösungen leicht geringerer Calcium-Gehalt angenommen.

Als potentiell wechselwirkende Liganden wurden neben Chlorid (Cl^-) und Hydroxid (OH^-) noch das unter den meisten geochemischen Bedingungen wichtige Carbonat-System berücksichtigt. Die Gesamtkonzentration an gelöstem anorganischem Carbonat $[\text{C}_{\text{tot}}] = [\text{CO}_2(\text{aq})] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$ wurde vereinfachend durch ein Löslichkeitsgleichgewicht mit Calcit $\text{CaCO}_3(\text{s})$ bzw. für die Magnesium-dominierte Lösung mit Chlorartinit $\text{Mg}_2\text{O}(\text{HCO}_3)\text{Cl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}(\text{s})$ berechnet.

Die Redoxbedingungen Eh (in Volt) bzw. $\text{pe} = 16.9\text{--Eh}$ (bei 25°C) wurden orientierend abgeschätzt. Für ein vollständig verschlossenes Tiefenlager (d. h. ein Tiefenlager ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit) wurde von stark reduzierenden Redoxbedingungen $(\text{pe} + \text{pHm}) = 2$ im Nahbereich der Abfälle ausgegangen, d. h. von einem sehr kleinen Sauerstoff-Partialdruck, wie sie für Systeme erwartet wird, in denen das Redoxverhalten im Wesentlichen durch korrodierendes Eisen und dessen Sekundärphasen wie Magnetit bestimmt werden (die genannten Werte liegen nahe an experimentellen Messwerten für Lösungen in Gegenwart von korrodierendem Eisen (Felmy u. a., 1989)). Für ein Tiefenlager mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit wurde für das generische Konzept davon ausgegangen, dass lediglich die Einlagerungskammern verfüllt werden, während der Schacht und die Infrastrukturstrecke offen bleiben. Hierdurch muss grundsätzlich von einem etwas höheren Sauerstoff-Partialdruck an den Abfallgebinden ausgegangen werden im Vergleich zum vollständig verschlossenen Tiefenlager. Als geochemische Randbedingung wurde $(\text{pe} + \text{pHm}) = 14$ ab-

Tabelle 5.4: Zusammenfassung orientierender geochemischer Randbedingungen (Lösungszusammensetzungen) für die im Arbeitspaket betrachteten generischen Tiefenlagerkonzepte. $[\text{CO}_3^{2-}]_{eq}$ bezeichnet die berechnete Gleichgewichtskonzentration an Carbonat.

Generische Tiefenlager	Orientierende geochemische Randbedingungen
Salzformation: „flache Lagerung“, pHm nahe-neutral	5.6 m NaCl + 0.05 m CaCl_2 / pHm 7 / $[\text{CO}_3^{2-}]_{eq} = 3 \cdot 10^{-6}$ m
Salzformation: „flache Lagerung“, pHm alkalisch	5.6 m NaCl + 0.02 m Ca(OH)_2 / pHm 13.0 / $[\text{CO}_3^{2-}]_{eq} = 1 \cdot 10^{-5}$ m
Salzformation: „steile Lagerung“	4.0 m MgCl_2 + 0.1 m NaCl / pHm 9 / $[\text{CO}_3^{2-}]_{eq} = 4 \cdot 10^{-6}$ m
Tonsteininformation: „Süddt. Opalinuston“, pHm nahe-neutral	0.2 m NaCl + 0.01 m CaCl_2 / pHm 8 / $[\text{CO}_3^{2-}]_{eq} = 5 \cdot 10^{-6}$ m
Tonsteininformation: „Süddt. Opalinuston“, pHm alkalisch	0.2 m NaCl + 0.02 m Ca(OH)_2 / pHm 12.5 / $[\text{CO}_3^{2-}]_{eq} = 1 \cdot 10^{-6}$ m
Tonsteininformation: „Norddt. Unterkreide“, pHm nahe-neutral	3.7 m NaCl + 0.25 m CaCl_2 / pHm 8 / $[\text{CO}_3^{2-}]_{eq} = 1 \cdot 10^{-6}$ m
Tonsteininformation: „Norddt. Unterkreide“, pHm alkalisch	3.7 m NaCl + 0.02 m Ca(OH)_2 / pHm 12.8 / $[\text{CO}_3^{2-}]_{eq} = 1 \cdot 10^{-5}$ m

geschätzt, was redox-neutralen Bedingungen entspricht (vgl. Neck u. a. (2007)). Die orientierenden geochemischen Randbedingungen für die generischen ENTRIA-Tiefenlagerkonzepte sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst. Für den Fall „ohne Rückholoption“ wurden stark reduzierende Redoxbedingungen ($\text{pe} + \text{pH}$) = 2 angenommen, und für den Fall „mit Rückholoption“ redox-neutrales Milieu mit ($\text{pe} + \text{pH}$) = 14, was zu einer Verdoppelung der Anzahl der betrachteten Fälle führt.

Primäre Radionuklidquellterme

Der Radionuklidquellterm gibt die Konzentration an gelöstem (mobilem) Radionuklid in direkter Umgebung der Abfallbehälter nach Kontakt bzw. Äquilibrierung mit der kontaktierenden wässrigen Lösung an. Grundsätzlich entspricht die Menge (Konzentration) an freigesetztem Radionuklid

nicht zwingend seinem Gesamtinventar im Abfall, da verschiedene geochemische Prozesse eine vollständige und instantane Mobilisierung der Radionuklide verhindern bzw. verzögern. Dazu gehören neben einer kinetisch langsamen Freisetzung aus der Abfallmatrix auch Rückhaltung durch Sorptionsprozesse an reaktiven Oberflächen, und insbesondere die für viele Radionuklide unter den zu erwartenden Randbedingungen eines Endlagers begrenzte Löslichkeit (bzw. die Schwerlöslichkeit vieler Radionuklidfestphasen). Diese Prozesse sind für die chemisch verschiedenen Radionuklide und Endlagerkonzepte von unterschiedlich ausgeprägter Relevanz.

Für die Quantifizierung der Radionuklidfreisetzung können die Radionuklide vereinfachend in zwei Fälle eingeteilt werden. Bei bekanntermaßen nicht-löslichkeitslimitierten Radionukliden (Cs, Sr, I), muss bei der Einschätzung der Mobilisierung insbesondere die Auslaugrate der Radionuklide bzw. die Korrosionsrate der Abfallmatrix berücksichtigt werden. Im Falle schwer löslicher Radionuklide (Actinide, Lanthanide, einige Spaltprodukte wie Tc) ist unter den Lösungsbedingungen nur ein (mitunter verschwindend geringer) Teil in gelöster Form stabil, während die Hauptmenge beim Erreichen der Löslichkeitsgrenze als immobil, schwer löslicher Feststoff ausfällt. Für diese Elemente kann die Löslichkeit zur Abschätzung der maximal freigesetzten Radionuklidmenge belastet werden.

Im Rahmen der Arbeiten zu AP 4.4 wurden für die generischen geochemischen Randbedingungen orientierende Radionuklidquellterme im Nahbereich der Abfälle für die Actiniden Uran (U), Neptunium (Np), Plutonium (Pu), und Americium (Am) auf Basis von Löslichkeitsgrenzen abgeschätzt (primäre Radionuklidquellterme). Die Radionuklidlöslichkeit beschreibt das thermodynamische Gleichgewicht zwischen der unter den jeweiligen geochemischen Randbedingungen löslichkeitsbestimmenden Radionuklidfestphasen und den dominierenden gelösten Radionuklidspezies, und gibt die (maximale) Konzentration an gelöstem, d.h. mobilem und damit austragbarem, Radionuklid in der Nähe der Abfälle an. Die Sorption primär freigesetzter Radionuklide an reaktiven Oberflächen wie korrodierenden Metallen, welche eine (mitunter beträchtliche) Verringerung der mobilen Radionuklidkonzentration bewirken können, wurde bei der Ableitung primärer Quellterme nicht berücksichtigt. Die Löslichkeiten wurden auf Grundlage thermodynamischer Gleichgewichtsrechnungen im Wesentlichen unter Verwendung der Daten und Konstanten der international anerkannten Datenbank der OECD/NEA (NEA-TDB, <https://www.oecd-nea.org/dbtdb/>) sowie des THEREDA-Projekts (<https://www.thereda.de/>) ermittelt. Die

für die Berücksichtigung des Einflusses erhöhter Salzkonzentrationen (Ionenstärken) auf die Gleichgewichtsreaktionen notwendigen Aktivitätskorrekturen wurden auf Basis des Pitzer-Ansatzes (Pitzer, 1991) bzw. der SIT (specific ion interaction theory) (Ciavatta, 1990) eingeschätzt. Zur Quantifizierung der Löslichkeitsgrenzen wurden grundsätzlich nur solche Radionuklidfestphasen und -spezies herangezogen, welche in wässrigen Systemen nachweislich relevant sind, letzteres auf Grundlage experimenteller Befunde bzw. im Sinne einer Experten-Einschätzung; so wurden beispielsweise keine nur durch Hochtemperatur-Tempnern erhältlichen (quasi) ideal-kristallinen Actinidfestphasen als löslichkeitslimitierend berücksichtigt, auch wenn deren thermodynamische Stabilität formal die höchste ist.

Die anhand der thermodynamischen Löslichkeit abgeschätzte maximale Konzentration an der Abfallmatrix (primäre Quellterme) für ausgewählte Actinide und für einige der in Tabelle 5.4 näher definierten orientierenden geochemischen Randbedingungen sind in Tabelle 5.5 aufgelistet. Der Einfluss von kolloidaler An(IV)-Spezies kann mit den aktuellen Daten der NEA-TDB nicht quantifiziert werden und wurde entsprechend nicht berücksichtigt, kann jedoch zu einer signifikanten Erhöhung der hier vereinfachend abgeschätzten Werte für U unter stark reduzierenden Bedingungen bzw. für Pu unter redox-neutralen Bedingungen führen. Grundsätzlich unterscheiden sich die berechneten Konzentrationen je nach Radionuklid und Bedingungen um bis zu sieben Größenordnungen. Jedes Radionuklid besitzt für die verschiedenen geochemischen Randbedingungen (Salzgehalt, pHm-Wert, Redoxbedingungen) ein grundsätzlich spezifisches Löslichkeitsverhalten, welches individuell bewertet werden muss. Verallgemeinernde Trends wie z. B. einheitliche Änderungen der Löslichkeit bei Übergang von stark reduzierenden („Tiefenlager ohne Rückholbarkeit“) zu redox-neutralen Bedingungen („Tiefenlager mit Rückholbarkeit“) sind nicht direkt erkennbar.

So ist die Löslichkeit des Uran beispielsweise unter stark reduzierendem Redoxmilieu („Tiefenlager ohne Rückholbarkeit“) für die verschiedenen Randbedingungen (Salz (NaCl), Ton-Süddt., Ton-Nordt.) praktisch gleich, während für Am und Pu deutliche Unterschiede erkennbar sind. Dies ist damit zu erklären, dass Uran als vierwertiges U(IV) vorliegt, dessen Löslichkeit kaum durch die variierenden Randbedingungen (Salz (NaCl), Ton-Süddt., Ton-Nordt.) beeinflusst wird, während Am als dreiwertiges Am(III) und Pu als drei- und vierwertiges Pu(III/IV) vorliegen, deren Löslichkeiten sensibel auf die Änderungen der Randbedingungen reagieren. Andererseits ist die Löslichkeit von Am für jeweils gleiche Randbedingungen (Salz, Ton-Süddt., Ton-Nordt.) nicht vom Redoxmilieu

Tabelle 5.5: Abgeschätzte Löslichkeiten für die Actinide Am, Pu und U für generische Tiefenlager ohne bzw. mit Rückholbarkeit entsprechend den in Tabelle 5.4 definierten orientierenden Randbedingungen.

	Tiefenlagerung ohne Rückholbarkeit stark reduzierende Bedingungen			Tiefenlagerung mit Rückholbarkeit redox-neutrale Bedingungen		
	[Am]	[Pu]	[U]	[Am]	[Pu]	[U]
Salzformation (NaCl): hoch salinar / pHm 7	$2 \cdot 10^{-4}$ mol/kg H ₂ O	$3 \cdot 10^{-4}$ mol/kg H ₂ O	$4 \cdot 10^{-9}$ mol/kg H ₂ O	$2 \cdot 10^{-4}$ mol/kg H ₂ O	$2 \cdot 10^{-11}$ mol/kg H ₂ O	$6 \cdot 10^{-4}$ mol/kg H ₂ O
Tonformation („Süddt.“): niedrig salinar / pHm 8	$5 \cdot 10^{-7}$ mol/kg H ₂ O	$3 \cdot 10^{-9}$ mol/kg H ₂ O	$3 \cdot 10^{-9}$ mol/kg H ₂ O	$5 \cdot 10^{-7}$ mol/kg H ₂ O	$2 \cdot 10^{-11}$ mol/kg H ₂ O	$4 \cdot 10^{-6}$ mol/kg H ₂ O
Tonformation („Norddt.“): hoch salinar / pHm 8	$7 \cdot 10^{-6}$ mol/kg H ₂ O	$1 \cdot 10^{-7}$ mol/kg H ₂ O	$3 \cdot 10^{-9}$ mol/kg H ₂ O	$7 \cdot 10^{-6}$ mol/kg H ₂ O	$2 \cdot 10^{-11}$ mol/kg H ₂ O	$9 \cdot 10^{-7}$ mol/kg H ₂ O

(„Tiefenlager ohne Rückholbarkeit“: stark reduzierend vs. „Tiefenlager mit Rückholbarkeit“: redox-neutral) abhängig, wohingegen die Löslichkeit von Pu bzw. U unter redox-neutralen Bedingungen niedriger bzw. höher ist als unter stark reduzierenden. Ursache hierfür ist, dass Am für beide Redoxbedingungen im gleichen chemischen Zustand (dreiwertigen) vorliegt, während die unter stark reduzierenden Bedingungen dominierenden U(IV) bzw. Pu(III/IV) unter redox-neutralen Bedingungen als U(VI) bzw. Pu(IV) vorliegen, was spezifische Änderungen der Löslichkeiten bedingt.

Die anhand von Löslichkeitsgrenzen abgeschätzten primären Quellterme für Americium, Plutonium und Uran in Tabelle 5.5 reflektierten die für die unterschiedlichen Tiefenlagern spezifischen geochemischen Randbedingungen, und erlauben formal eine erste qualitative Unterscheidung der verschiedenen Konzepte nach der Menge an potentiellen mobilisierten Radionukliden. Sie sind daher ein wichtiges Werkzeug, um eine potentielle Radionuklidmigration im Nahfeld eines Tiefenlagers einzuschätzen. Zur Beurteilung einer potentiellen radiologischen Belastung sind allerdings weitere wichtige Aspekte zu berücksichtigen, z. B. die Wahrscheinlichkeit, dass es überhaupt zu einem Lösungszutritt kommt, was für die einzelnen Tiefenlagerkonzepte unterschiedlich zu bewerten ist. Weiterhin handelt es sich bei den hier vorgestellten, primären Quelltermen um maximale Radionuklidkonzentrationen, da wichtige zusätzliche Rückhalte-mechanismen wie Sorption nicht berücksichtigt sind, welche ebenfalls spezifisch für die einzelnen Konzepte ist.

Experimentelle Studien zur Verbesserung der thermodynamischer Datenbasis für Plutonium und Neptunium

Für eine verlässliche Ableitung von Radionuklidquelltermen auf Grundlage von Löslichkeitsgrenzen sowie für die Simulation von Radionuklid-Transportprozessen ist eine qualitätsgesicherte, aktuelle und konsistente thermodynamische Datenbasis eine wesentliche Grundvoraussetzung. Weiterhin ist eine stetige Erweiterung bzw. Verbesserung der Datenlage zur Erzielung eines detaillierten Prozessverständnisses, und zur Reduzierung von Ungewissheiten bei der Abschätzung von Radionuklidquelltermen notwendig. Insbesondere für Actinidelemente wie das Plutonium sind verlässliche Einschätzungen des Verhaltens in wässriger Lösung unter bestimmten geochemischen Randbedingungen auf Grundlage des aktuellen Kenntnisstandes, wie er z. B. im Datenbankprojekt der OECD/NEA (NEA-TDB) berücksichtigt ist, nur unzureichend bzw. nur mit großen Ungenauigkeiten möglich. Dies betrifft zum Teil auch solche Bedingungen, wie sie für die generischen Tiefenlagerkonzepte in Tabelle 5.4 definiert wurden. Im Rahmen des Arbeitspakets AP 4.4 wurden von KIT-INE exemplarische Laborstudien zur Löslichkeit und wässrigen Speziation der Actinide Pu und Np durchgeführt, mit dem Ziel, den Kenntnisstand für diese Elemente für relevante geochemische Randbedingungen zu verbessern. In insgesamt drei unabhängigen experimentellen Studien wurde das Löslichkeitsverhalten und die Komplexbildung mit Hydroxid, OH^- , bzw. Carbonat, CO_3^{2-} , von Pu und Np in unterschiedlichen Oxidationsstufen (+IV, +V, +VI) untersucht. Die beiden sehr umfassenden Studien zu Actinid(IV)- und zu Plutonium(VI)-Löslichkeit sind innerhalb der schwerpunktmäßig experimentell ausgelegten Doktorarbeit von J. Schepperle (KIT-INE) entstanden. Eine kurze Beschreibung des Hintergrundes sowie der Ergebnisse dieser Studien ist im Folgenden dargestellt.

Die experimentellen Arbeiten mit bis zu 200 mg der alpha-strahlenden Elemente ^{242}Pu und ^{237}Np wurden im Kontrollbereich des KIT-INE in alphasicheren Handschuhboxen unter inerter Argon-Atmosphäre bei Raumtemperatur ($T = 23 \pm 2^\circ\text{C}$) durchgeführt. Zur Charakterisierung der löslichkeitsbestimmenden Actinid-Festphasen sowie der Konzentration und Speziation der gelösten Actinide und zur Analyse der Lösungsparameter wie pHm-Wert und Redoxpotential wurden am KIT-INE etablierte Methoden (z. B. Flüssigszintillationsmessung, (hoch aufgelöste) Massenspektrometrie, Optische Emissionsspektroskopie, Potentiometrie, UV-Vis / NIR-Spektroskopie, Röntgen-Pulverdiffraktometrie), sowie teilweise moderne Synchrotron-basierte Spektroskopie angewandt (z. B. XANES, EXAFS).

Pu(IV) und Np(IV) Löslichkeit und wässrige Speziation in carbonathaltiger verdünnter bis konzentrierter NaCl-Lösung unter reduzierenden Bedingungen. Unter reduzierenden Redoxbedingungen, wie sie für mittlere bis lange Zeithorizonte in einem vollständig verschlossenen Tiefenlager ohne Sauerstoffzutritt zu erwarten sind, spielt die vierwertige Oxidationsstufe der Actinide, An(IV), eine zentrale Rolle für die aquatische Chemie von Th, U, Np und Pu. Das Löslichkeits- und Hydrolyse-Verhalten für diese Elemente in carbonatfreier, alkalischer Elektrolytlösung (NaCl, CaCl₂) ist gut bekannt und belastbar thermodynamisch modellierbar, vgl. (Neck u. Kim, 2001; Guillaumont u. a., 2003; Altmaier u. a., 2008; Fellhauer u. a., 2010). Für alkalische, carbonathaltige NaCl-Lösungen hingegen gibt es jedoch nur für Th(IV), und eingeschränkt für Np(IV), eine umfassende experimentelle Datenlage und gut abgesicherte thermodynamische Modelle (Altmaier u. a., 2006; Kitamura u. Kohara, 2004), während insbesondere für Pu(IV) fast keine systematischen Löslichkeitsuntersuchungen beschrieben sind, was zu großen Ungenauigkeiten bei der Ableitung entsprechender Konzentrationshöchstgrenzen für diese Randbedingungen führt. Zur Verbesserung der Datenlage wurden daher im Rahmen der Doktorarbeit von J. Schepperle experimentelle Untersuchungen zum Löslichkeitsverhalten von vierwertigem PuO₂(am,hyd) sowie, als Vergleich, dem analogen NpO₂(am,hyd) in 0.5, 2.0 und 5.0 M NaCl-Lösung in Gegenwart von Carbonat mit $[C_{tot}] = [CO_2(aq)] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] = 0.04$ und 0.1 M unter reduzierenden Bedingungen durchgeführt. Letztere wurden durch Zugabe kleiner Mengen an Hydrochinon (Pu) bzw. SnCl₂ (Np) realisiert. Die experimentell bestimmten Löslichkeitskurven für Pu(IV) und Np(IV) sind in Abbildung 5.12 gezeigt (molale Konzentrationsskala). Die auf Grundlage dieser Daten neu abgeleiteten thermodynamischen Modelle auf Basis der SIT (specific ion interaction theory) sind als Linien dargestellt. Allgemein liegen die gemessenen Pu- und Np-Löslichkeiten im untersuchten pHm-Bereich grundsätzlich höher im Vergleich zu den Ergebnissen von früheren Experimenten ohne Carbonat, vgl. (Guillaumont u. a., 2003), was die starke Wechselwirkung von Actinid(IV)-Verbindungen mit Carbonat belegt. Die An(IV)-Löslichkeit steigt systematisch mit steigender Carbonat- sowie mit steigender NaCl-Konzentration an.

Auf Basis der umfassenden experimentellen Datenlage konnte gezeigt werden, dass die Ursache für die Erhöhung der An(IV)-Löslichkeit unter den untersuchten Randbedingungen vorwiegend durch die Bildung einer gemischten An(IV)-OH-CO₃-Spezies bedingt ist, welche im bisherigen Modell der NEA-TDB (Guillaumont u. a., 2003) für Np(IV) und Pu(IV) nicht beschrieben ist. Darauf aufbauend wurde ein chemisches Modell der dominierenden Gleichgewichtsreaktion sowie die entsprechenden

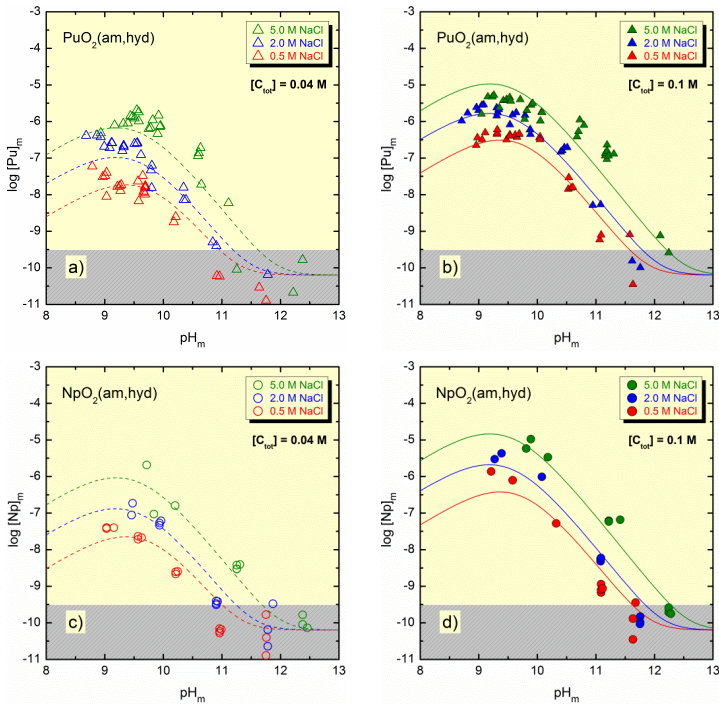


Abbildung 5.12: Experimentelle Löslichkeit von vierwertigem $PuO_2(am, hyd)$ (a+b) und $NpO_2(am,hyd)$ (c+d) in carbonathaltiger 0.5, 2.0 und 5.0 M NaCl-Lösung mit $[C_{tot}] = [CO_2(aq)] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] = 0.04 M$ und 0.1 M unter reduzierenden Bedingungen.

thermodynamischen Daten und SIT-Wechselwirkungsparameter abgeleitet (Modellkurven in Abbildung 5.12). Im Vergleich zu Pu(IV) und Np(IV) weist das gut untersuchte leichtere Homologe Th(IV) unter denselben Bedingungen eine stärker ausgeprägte Abhängigkeit von der Carbonat- und NaCl-Konzentration, und höhere Löslichkeiten auf, was auf eine unterschiedliche chemische Speziation des gelösten Th(IV) zurückzuführen ist, vgl. (Altmaier u. a., 2006). Insgesamt liefern die Ergebnisse ein verbessertes Prozessverständnis für das Verhalten vierwertiger Actinide in carbonathaltiger NaCl-Lösung und erlauben eine wesentlich besser abgesicherte Ableitung von Radionuklidquelltermen für Pu(IV) und Np(IV) unter diesen Randbedingungen.

Np(V) in alkalischer NaCl-dominiertter Lösung mit Spuren an CaCl_2 unter redox-neutralen Bedingungen. Der fünfwertigen Oxidationsstufe von Actiniden, An(V), wird die höchste Mobilität in wässrigen Systemen im Vergleich zu den anderen Oxidationsstufen zugeschrieben. Dies lässt sich durch ein insgesamt geringeres Rückhaltevermögen der An(V)-Spezies an Mineralphasen (Sorption) sowie eine hohe Löslichkeit der hydroxidischen Festphase $\text{AnO}_2\text{OH(am)}$ erklären. Während die Oxidationsstufe +V für die Actinide U, Pu und Am von untergeordneter Bedeutung ist, stellt sie für das Np den wichtigsten chemische Zustand unter oxidierenden und redox-neutralen Bedingungen über weite pH-Bereiche dar. In aktuellen Arbeiten des KIT-INE konnte gezeigt werden, dass die gut lösliche Festphase $\text{NpO}_2\text{OH(am)}$ in alkalischer NaCl-Lösung und in alkalischer CaCl_2 -Lösung tatsächlich innerhalb weniger Wochen bis Monate spontan in stabilere, kristalline Phasen des Typs $\text{Na}_y\text{NpO}_2(\text{OH})_{1+y} \cdot x\text{H}_2\text{O(cr)}$ bzw. $\text{Ca}_{0.5}\text{NpO}_2(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O(cr)}$ übergeht, was zu einer signifikanten Verringerung des Np(V)-Löslichkeit bzw. der -Mobilität in den entsprechenden Lösungen führt, vgl. (Petrov u. a., 2017) und (Fellhauer u. a., 2016). Über das Verhalten von Np(V) in gemischten NaCl- und CaCl_2 -haltigen alkalischen Lösungen, welche unter meisten geochemischen Randbedingungen relevant sind (vgl. Tabelle 5.1), wurde bisher nicht berichtet. Im Rahmen der Arbeiten in AP 4.4 wurde daher das Löslichkeitsverhalten von Np(V) in alkalischen NaCl-dominierten Lösungen (0.1 und 5.0 M NaCl) mit Spurenkonzentrationen an $[\text{CaCl}_2] = 6 \cdot 10^{-4}$ M systematisch als Funktion des pHm-Wertes (9-13) und der Zeit (Untersuchungszeitraum bis zu 1 Jahr) durch Laborexperimente untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass trotz des deutlichen Überschusses an Natriumionen (die Verhältnisse an Natrium- zu Calciumionen in den experimentellen Serien lagen bei ca. 167:1 bzw. 8330:1) die initial zugegebene Calcium-haltige Np(V)-Festphase, $\text{Ca}_{0.5}\text{NpO}_2(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O(cr)}$, die Löslichkeit von Np(V) kontrolliert. Zusätzliche Experimente mit initial gelöstem Np(V) bestätigen diese Beobachtungen. Es wurde ein (vorläufiges) chemisches und thermodynamisches Modell zur Beschreibung der Daten abgeleitet. Diese experimentellen Löslichkeitskurven (molale Konzentrationsskala) sind in Abbildung 5.13 dargestellt im Vergleich zu Modellrechnungen auf Basis der aktuellen thermodynamischen Datenbank der NEA-TDB (Guillaumont u. a., 2003) mit $\text{NpO}_2\text{OH(am)}$ als löslichkeitskontrollierender Festphase. Literaturdaten bzw. NEA-TDB-Modellrechnungen für reine NaCl-Lösungen liegen in manchen pHm-Bereichen mehr als drei Größenordnungen über den in unserer aktuellen Studie experimentell bestimmten Werten für NaCl-dominierte Lösungen mit Spuren an CaCl_2 . Dies lässt sich dadurch erklären, dass die NEA-TDB bisher keine thermodynamischen Daten für

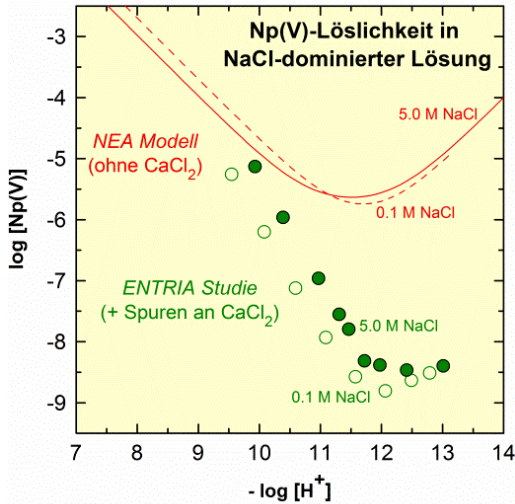


Abbildung 5.13: Experimentelle Löslichkeit von fünfwertigem $\text{Ca}_{0.5}\text{NpO}_2(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}(\text{cr})$ in 0.1 (offene Symbole) und 5.0 M (geschlossene Symbole) NaCl-Lösung in Gegenwart von Spuren an CaCl_2 ($6 \cdot 10^{-4}$ M) unter redox-neutralen Bedingungen im Vergleich zu Modellrechnungen (0.1 M NaCl: gestrichelte Linie, 5.0 M NaCl: durchgezogene Linie).

Np in alkalischen Ca-haltigen Lösungen aufweist, und entsprechend nur die Löslichkeit von binärem $\text{NpO}_2\text{OH}(\text{am})$ simuliert werden kann. Die im Rahmen von AP 4.4. erzielten Ergebnisse erlauben zusammen mit (Petrov u. a., 2017) und (Fellhauer u. a., 2016) eine deutlich realistischere Abschätzung von Radionuklidquelltermen für fünfwertige Actinide (Np) in endlagerrelevanten Lösungen im Vergleich zur NEA-TDB, und unterstreichen weiterhin die hohe Relevanz bestimmter (Spuren-)Elemente wie Ca^{2+} auf die wässrige Chemie von Actiniden.

Pu(VI) Festphasenbildung, Löslichkeit und Hydrolyse in alkalischer NaCl-dominierten Lösung unter oxidierenden Bedingungen. Die sechswertige Oxidationsstufe der Actinide, An(VI) , wird insbesondere vom Uran in redox-neutraler und oxidierender wässriger Lösung über den gesamten pH-Bereich stabil ausgebildet, während sie für Neptunium und Plutonium nur in mittel bis stark alkalischen, oxidierenden Systemen relevant sind. Oxi-

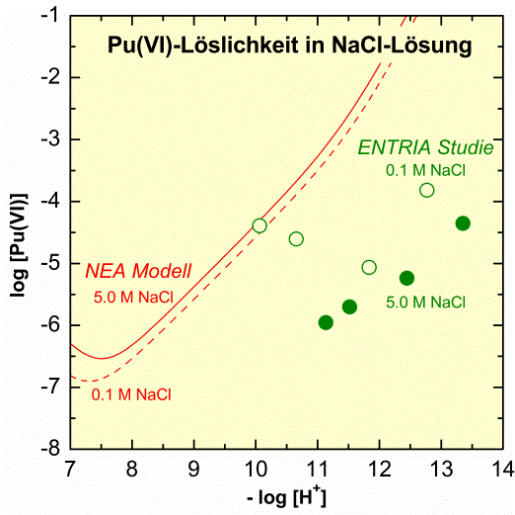


Abbildung 5.14: Experimentelle Löslichkeit von initial sechswertigem $\text{Na}_2\text{Pu}_2\text{O}_7 \cdot x\text{H}_2\text{O}(\text{cr})$ in 0.1 (offene Symbole) und 5.0 M (geschlossene Symbole) NaCl-Lösung unter oxidierenden Bedingungen im Vergleich zu Modellrechnungen (0.1 M NaCl: gestrichelte Linie, 5.0 M NaCl: durchgezogene Linie).

dierende Redoxbedingungen sind im Kontext der Tiefenlagerung u. a. auf Grund der großen Menge an reduzierendem Eisen mittel- und langfristig nicht zu erwarten, und sind lediglich für lokal und zeitlich begrenzte Bereiche unter speziellen Voraussetzungen denkbar (z. B. die oxidative Freisetzung von Radionukliden aus der Brennstoffmatrix unter radiolytisierenden Bedingungen oder das Behälterversagen in einer frühen Phase nach Schließung der Tiefenlagers mit noch nicht verbrauchtem Rest-Sauerstoff).

Im Kontext von Störfallszenarien in Langzeitzwischenlagern an der Oberfläche besitzen oxidierende Bedingungen hingegen große Relevanz. Während für U(VI), und, mit Abstrichen, auch für Np(VI) gut abgesicherte chemische und thermodynamische Modell zur Quantifizierung des Löslichkeits- und Hydrolyseverhaltens in neutraler bis alkalischer Elektrolytlösung zur Verfügung stehen, gibt es für Pu(VI) keine/kaum entsprechende Daten. Daher wurde das Verhalten von Pu(VI) in wässriger Lösung näher untersucht. Der Schwerpunkt lag auf der (erstmaligen) Synthese der löslichkeitsbestimmenden Pu(VI)-Festphasen in alkalischen NaOH-

NaCl- und CaCl_2 - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösungen, was durch milde hydrothermale Bedingungen erfolgreich gelang. Es wurde entsprechend eine Natrium-haltige und eine Calcium-haltige Pu(VI)-Festphase mit den stöchiometrischen Formeln $\text{Na}_2\text{Pu}_2\text{O}_7 \cdot x\text{H}_2\text{O}(\text{cr})$ und $\text{CaPuO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}(\text{cr})$ gewonnen. Umfassende Charakterisierung der beiden Pu(VI)-Festphasen mittels zahlreicher spektroskopischer und analytischer Methoden wurde erfolgreich durchgeführt.

Um erste Erkenntnisse über die thermodynamische Stabilität in Lösung zu erhalten, wurden weiterhin erste Löslichkeitsuntersuchungen mit initial eingesetztem $\text{Na}_2\text{Pu}_2\text{O}_7 \cdot x\text{H}_2\text{O}(\text{cr})$ in alkalischer 0.1 und 5.0 M NaCl-NaOH-Lösung unter oxidierenden Bedingungen durchgeführt. Letztere wurden durch Zugabe kleiner Mengen an Natriumhypochlorit eingestellt. Die gemessenen Löslichkeitsdaten (molale Konzentrationsskala) sind in Abbildung 5.14 dargestellt im Vergleich zur modellierten Pu(VI)-Löslichkeitskurve für dieselben Lösungssysteme auf Basis der Daten der NEA-TDB mit $\text{PuO}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{cr})$ als löslichkeitskontrollierender Festphase (Guillaumont u. a., 2003). Die experimentell beobachtete Pu(VI)-Löslichkeit für die Natrium-haltige Pu(VI)-Festphase liegt signifikant unterhalb des simulierten NEA-TDB-Modells, was die höhere Stabilität und Relevanz der neuen Natrium-haltigen Pu(VI)-Festphase in stark alkalischer NaCl-Lösung im Vergleich zum bekannten $\text{PuO}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{cr})$ unterstreicht. Mittels parallel dazu durchgeführter Vis / NIR-spektroskopischer Untersuchungen konnte weiterhin nähere Informationen zur dominierenden Pu(VI)-Lösungsspezies in stark alkalischer Lösung mit $\text{pH}_\text{m} > 11$ erzielt werden. Die Ableitung eines thermodynamischen Modells zur Löslichkeit von Pu(VI) in alkalischer NaCl-Lösung sowie analoge Experimente mit der Calcium-haltigen Pu(VI)-Festphase sind geplant.

Die Ergebnisse dieser sehr aufwendigen experimentellen Studien liefern erstmalig qualitativ hochwertige Löslichkeitsdaten für die Actinide Pu und Np für die betrachteten geochemischen Randbedingungen, und decken relevante Bandbreiten an geochemischen Parametern (pH_m , Salzkonzentration etc.) umfassend ab. Die auf Basis dieser Daten abgeleiteten chemischen Modelle sowie die entsprechenden thermodynamischen Konstanten und Parameter ermöglichen ein wesentlich verbessertes geochemisches Prozessverständnis von Actiniden unter endlagerrelevanten Bedingungen im Vergleich zum früheren Kenntnisstand. Insbesondere erlauben die Resultate erstmalig sehr verlässliche Einschätzungen des löslichkeitserhöhenden Effektes von gelöstem Carbonat auf Plutonium unter reduzierenden Bedingungen, sowie der Löslichkeit von Plutonium unter oxidierenden Bedingungen. Hierdurch werden einige wichtige Kenntnisstands- und Datenbasislücken erfolgreich geschlossen, was Ungenau-

igkeiten bei der Radionuklid-Quelltermabschätzungen sowie -Transportmodellierungen verringert. Die gewonnenen Erkenntnisse sind von allgemeiner Gültigkeit und Relevanz im Kontext eines geochemisch basierten Langzeitsicherheitsnachweises und nicht auf die generischen ENT-RIA-Konzepte beschränkt.

5.4.5 Einfluss der Radionuklidspeziation auf Transferfaktoren

Im Arbeitspaket „Einfluss der Radionuklidspeziation auf Transferfaktoren“ wurden neue Erkenntnisse zur Pflanzenverfügbarkeit und -aufnahme von Radionukliden gewonnen. Diese Erkenntnisse könnten künftig beispielsweise im Rahmen eines quantitativen Vergleichs der Risiken, die mit den drei bei ENTRIA untersuchten Entsorgungsoptionen einher gehen, genutzt werden.

Ausgangslage

Selbst geringe Radionuklidkonzentrationen im Boden bzw. in der Pflanze können letztlich bei der Abschätzung der Ingestionsdosis über die Nahrungskette einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss haben. Die Kenntnis und Erforschung der Aufnahmeeinflüsse und -mechanismen von Radionukliden in Pflanzen ist daher von großer Bedeutung. Die Pflanzenverfügbarkeit und -aufnahme von Radionukliden ist von diversen Faktoren abhängig. Das Verständnis der chemischen und physikalischen Prozesse während der Aufnahme gelöster Radionuklidspezies aus dem Bodenwasser dient als Grundlage für den Eintrag in die verschiedenen Pflanzenteile und letztlich für die Abschätzung der Ingestionsdosis nach Verzehr der Pflanzen. Moderne Messmethoden ermöglichen Konzentrations- und Speziationsbestimmungen im Spurenkonzentrationsbereich (Graser u. a., 2015) von bis zu $10^{-12} \text{ mol L}^{-1}$. Der Transferfaktor (TF), der die Aufnahme von Radionukliden vom Boden in eine Pflanze beschreibt, ist keine universelle Konstante, sondern variiert zum Teil sehr stark über mehrere Größenordnungen. Für Plutonium liegt er zwischen 10^{-3} und 10^{-10} (International Atomic Energy Agency, 2009). Grund hierfür sind diverse Faktoren, die den TF beeinflussen, wie z. B. die Beschaffenheit des Bodens, der Mineralstoffgehalt, die Düngung, das Vorkommen von Mikroorganismen, die jeweilige Pflanzenart, etc. Eine bisher oft vernachlässigte Komponente ist der Einfluss der chemischen Speziation der Radionuklide selbst, insbesondere Oxidationszustand, chemische Verbindung, Bildung von Komplexen, z. B. mit organischen Liganden etc.

Untersuchungsschwerpunkte

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde die Radionuklidaufnahme von Erbsen- (*Pisum sativum*), Paprika- (*Capsicum annuum*) und Kartoffelpflanzen (*Solanum tuberosum*) bei geringen Radionuklidkonzentrationen von 10^{-5} bis 10^{-7} mol L⁻¹ für Uran (U) und von 10^{-7} bis 10^{-9} mol L⁻¹ für Plutonium (Pu) in flüssigem Nährmedium untersucht. Einige Pu-Nährlösungen wurden zusätzlich mit dem organischen Komplexbildner EDTA in Konzentrationen von 10^{-4} und 10^{-3} mol L⁻¹ versetzt, um den Einfluss auf die Löslichkeit des Pu und die Pflanzenaufnahme zu untersuchen.

In den jeweiligen Nährlösungen wurden in regelmäßigen Abständen der pH-Wert, das Redoxpotential und die gelöste Radionuklidkonzentration bestimmt. Die Speziationsanalyse erfolgte mithilfe verschiedener spektroskopischer Messmethoden (TRLFS, UV-Vis-Spektroskopie, CE-ICP-MS) sowie thermodynamischer Modellierungen auf Basis der chemischen Gleichgewichtskonstanten mit dem Speziationsprogramm PHREEQC (Parkhurst u. Appelo, 1999). Am Ende der Versuchsreihen wurde die Radionuklidkonzentration in verschiedenen Pflanzenteilen (Wurzeln, Stängel / Blätter, Früchte) ermittelt. Darüber hinaus wurden Parameter für oxidative Stressreaktionen untersucht, die von der Pflanze als Reaktion auf bzw. als Abwehrmechanismen gegenüber Schwermetalltoxizität beeinflusst werden (Chlorophyllgehalt der Blätter, reaktive Sauerstoffverbindungen u. a.). Die Ergebnisse der Speziationsbestimmung und der Pu-Konzentration in den Pflanzenteilen dienten als Grundlage für die Ermittlung der Korrelation zwischen Pu-Speziation und Pu-Aufnahme in die Pflanzen. Zusätzlich wurde aus dem Pu-Eintrag in die Pflanzen eine Dosisabschätzung für den Ingestionspfad modelliert.

Ergebnisse

Dieser Beitrag zum Verständnis der Wechselwirkung zwischen Pflanzen und der Verfügbarkeit von Radionukliden zeigt Wege für intensivere Untersuchungen der komplexen Aufnahme- und Akkumulationsprozesse von Radionukliden in Pflanzen auf, die eine realistische Dosisexpositionsmodellierung erlauben. Die Untersuchungen zu der Aufnahme von Actiniden in Pflanzen zeigten für Uran- und Plutoniumkonzentrationen zwischen 10^{-7} und 10^{-9} mol L⁻¹, dass die effektiv gelöste Konzentration bereits in den ersten Tagen nach der Radionuklidzugabe in die Nährlösung aufgrund von Präzipitation stark abnahm (60 % bis 80 %). Die Beobachtung, dass besonders in den Wurzelproben hohe Werte der jeweiligen Radionuklide gemessen wurden (10 % bis 50 % der zugefügten Gesamtmenge), legt nahe, dass diese entweder an der äußeren Wurzeloberfläche

adsorbieren oder in den Apoplasten (interzellulärer Raum) gelangen und sich dort mit Komponenten der Zellwand immobil verbinden. Der Transport in weitere Pflanzenteile (Stängel, Blätter, Früchte) war vergleichsweise gering ($< 0,4\%$). Für die Kartoffelknollen lag der Transferfaktor je nach Pu-Anfangskonzentration zwischen 0,03 und 0,80 ($\text{Bq g}^{-1}/\text{Bq L}^{-1}$). Die Zugabe des Komplexbildners EDTA ($10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$) in die Nährlösung förderte die Löslichkeit und den Eintrag von Pu in die Stängel / Blätter (+ 155 %) sowie in die essbaren Kartoffelknollen der Kartoffelpflanzen (+ 58 %).

Während nach den Speziationsberechnungen in den Lösungen mit Pu-Konzentrationen von $10^{-7} \text{ mol L}^{-1}$ Plutonium in gelöster Form hauptsächlich als Pu(IV)--Hydroxidkomplexe vorlag ($\text{Pu}(\text{OH})_3^+$, $\text{Pu}(\text{OH})_4(\text{aq})$), wiesen die Lösungen mit einer hundertfach geringeren Pu-Konzentration ($10^{-9} \text{ mol L}^{-1}$) einen hohen Anteil des stabilen und mobilen Pu(V)-Komplexes PuO_2^+ auf (bis zu 25 % bei pH 7,0). Durch EDTA-Zugabe ($10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$) bildete der gesamte Pu-Gehalt Pu(IV)-EDTA-Komplexe. Trotz des geringen gelösten Gehalts und des Störeinflusses diverser anderer Ionen in der Nährlösung konnte in versuchsbegleitenden, direkten Messungen die Pu-Speziationen mittels CE-ICP-MS für einige Proben durchgeführt werden.

Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass bei geringen Radionuklidkonzentrationen der Einfluss der von den Pflanzen ausgeschiedenen Substanzen eine wichtige Rolle bei der Verfügbarkeit der Radionuklide spielt. Zum anderen wird deutlich, dass Plutonium selbst in geringen Konzentrationen im für die Ingestionsdosis nicht zu unterschätzenden Maße von den Pflanzenwurzeln aufgenommen und in verschiedenen Pflanzenteilen akkumuliert wird.

5.4.6 Langzeitsicherheit von Tiefenlagern

Im Arbeitspaket „Langzeitsicherheit von Tiefenlagern“ wurde ein Software-Werkzeug zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Tiefenlagern entwickelt. Dieses Software-Werkzeug kann auch zur vergleichenden Betrachtung und Bewertung von Tiefenlageroptionen für radioaktive Abfälle im Hinblick auf den Schutz vor radio- und chemotoxischen Stoffen und vor ionisierender Strahlung über lange Zeiträume eingesetzt werden. Es bietet potentiell Unterstützung bei der vergleichenden Risikobewertung von Entsorgungsoptionen, vor allem aber bei Ausbildung und Kommunikation im Bereich der Langzeitsicherheit.

Ausgangslage

Gegenwärtig existieren verschiedene Software-Produkte, die zur deterministischen und probabilistischen Simulation sicherheitsrelevanter Prozesse und zur radiologischen Konsequenzenanalyse in einem Tiefenlagersystem verwendet werden können. Darunter sind sowohl kommerzielle Produkte wie z. B. AMBER (Quintessa, 2011), als auch von Endlager-Vorhabenträgern, Genehmigungsbehörden bzw. deren Gutachtern und Forschungsorganisationen entwickelte spezialisierte nicht kommerzielle Werkzeuge, wie z. B. die französische ALLIANCES-Software (Montarnal u. a., 2005) oder der Code EMOS (Buhmann, 1999).

Diese Produkte stoßen entweder an Grenzen hinsichtlich der Komplexität des Modellierungsumfangs (insbesondere die kommerzielle Software), oder sie haben Nachteile in der Flexibilität der Anwendung von externen Simulationskernen.

Untersuchungsschwerpunkte

Die Entwicklung der Softwareplattform „Repository Simulation, Uncertainty Propagation and Sensitivity Analysis“ (ReSUS) schafft komplementär zu diesen bereits existierenden und sich in der Weiterentwicklung befindlichen Programmen zur Bewertung der Langzeitsicherheit ein wichtiges Werkzeug, das auch in der Aus- und Weiterbildung eingesetzt werden und die Kommunikation mit der Öffentlichkeit unterstützen kann. Methoden zum Datenmanagement, zur Visualisierung und zur Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse bieten einen Mehrwert gegenüber den bisher verwendeten einzelnen THMC-Codes. Ein weiterer Mehrwert ergibt sich aus der Gestaltung des Workflows und aus der Nutzeroberfläche, die eine niedrige Einstiegsschwelle schaffen und damit auch einen Einsatz in Lehre, Aus- und Weiterbildung ermöglichen.

ReSUS sollte in der Lage sein, Simulationskerne für Teilprobleme eines Tiefenlagersystems miteinander zu verketten und Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen auf diesen Simulationsketten durchzuführen. Für den weiteren Verlauf dieses Kapitels werden solche Simulationsketten als ReSUS-Modelle bezeichnet. Eine genauere Definition eines ReSUS-Modells und der darauf geltenden Einschränkungen folgt im entsprechenden Abschnitt.

Software-Werkzeuge zur numerischen Simulation von thermischen, hydraulischen, mechanischen oder (geo-)chemischen Prozessen werden seit vielen Jahren entwickelt. Es wurde daher bewusst entschieden, ReSUS als Werkzeug von der konkreten Simulation solcher Prozesse zu abstrahieren und existierende Simulationswerkzeuge als Simulationskerne für

die Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse nutzbar zu machen. Um solche Analysen zu ermöglichen, ohne die existierenden Simulationskerne zu modifizieren (die oftmals nur als Binärdatei vorliegen), ist es erforderlich ReSUS-Modelle wiederholt zu simulieren. Auf diesem Weg können für jede Simulation pseudo-zufällige, gegebenen Verteilungsfunktionen genügende Eingabedaten verwendet und die jeweils berechneten Simulationsergebnisse gespeichert werden.

Als Werkzeug der Forschung dient ReSUS nicht nur der Simulation von numerischen Modellen, sondern darüber hinaus stellt es auch Hilfsmittel bereit, um Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchzuführen. Hierfür sollte eine eigenständige Komponente entwickelt werden, die die Ergebnisse einer Simulation in flexibel konfigurierbaren Diagrammen (Streudiagrammen, Liniendiagrammen und Histogrammen) visualisiert und unterschiedliche Sensitivitätsmaße berechnet. Da die Forschung an theoretischen Grundlagen der Sensitivitätsanalyse während des Projekts fortgesetzt werden sollte, musste dieses Werkzeug hinreichend flexibel gehalten werden, um die Integration neuer Sensitivitätsmaße oder graphischer Darstellungen zu ermöglichen.

Als Werkzeug der Lehre musste ReSUS geeignet sein, um in Lehrveranstaltungen eingesetzt werden zu können. Daraus ergaben sich insbesondere Anforderungen an die Bedienbarkeit der grafischen Benutzeroberfläche, sowie an die Robustheit in Bezug auf Fehler in der Erstellung oder Konfiguration von ReSUS-Modellen. Darüber hinaus erforderte dies die Erstellung geeigneter Dokumentation in Form eines Benutzerhandbuchs und geeigneter Lehrmaterialien.

Unabhängig davon, ob ein Werkzeug nur in Forschung und Lehre oder auch zur Führung von Langzeitsicherheitsnachweisen eingesetzt wird, ergeben sich im Umfeld der Endlagerung von radioaktiven Reststoffen hohe Qualitätsanforderungen an die erstellte Software. Die ReSUS-Softwareentwicklung erfolgte daher unter Verwendung von Subversion (Apache Software Foundation, 2018) zur Versionierung des Quellcodes. Änderungen und Weiterentwicklungen wurden in der Softwareentwicklungsumgebung Redmine geplant und umgesetzt. Zur aktiven Qualitätssicherung wurden Unit-Tests durchgeführt, wobei eine Zweigabdeckung von >95 % angestrebt wurde. Die Architektur, Werkzeuge und Entwicklungsmuster wurden in einem Entwicklerleitfaden zusammengefasst, der als lebendes Dokument kontinuierlich gepflegt wird. Zusätzlich zum Entwicklerleitfaden bietet das Benutzerhandbuch zu ReSUS eine Schnellstartanleitung und eine Referenz für Endanwender.

Die ReSUS-Entwicklung umfasste zwei Promotionsvorhaben (Li, 2015; Ghofrani, 2016) und weitere daran anknüpfende Arbeiten sowie theore-

tische Untersuchungen hinsichtlich der Grundlagen für die probabilistische Sensitivitätsanalyse. Die Plattform wurde im Vertikalprojekt 5 eingesetzt (Abschnitt 5.5.2). Im Rahmen studentischer Projekt- und Abschlussarbeiten werden Studierende an Modellierungstätigkeiten herangeführt (Habibi, 2016; Bojanowski, 2017; Ren, 2017; Wagner u. Wilhelm, 2018).

Methodik und Software-Architektur

Bei ReSUS handelt es sich um ein Scientific Workflow Management System (Ghofrani, 2016). Solche Systeme haben gemein, dass eine Reihe von Berechnungen oder Datenmanipulationen hintereinander ausgeführt werden, um so einen komplexen Sachverhalt in mehreren Schritten zu bearbeiten. Dadurch bieten Scientific Workflow Management Systeme Wissenschaftlern eine Möglichkeit an komplexen Systemen gemeinsam zu arbeiten. Im Unterschied zu vielen etablierten Systemen, die auch manuelle Schritte zulassen, erlaubt ReSUS nur die Verwendung von Simulationskernen, die automatisch aufgerufen werden können. Diese Einschränkung ist sinnvoll, da bei einer hohen Anzahl an Simulationsausführungen manuelle Schritte die Ausführung erheblich verlangsamen. Darüber hinaus würde die Ausführung auf Systemen, die keine Nutzerinteraktion erlauben, unmöglich.

ReSUS wurde modular aufgebaut. Die wesentlichen Komponenten und Werkzeuge werden im Folgenden kurz aufgeführt und in den folgenden Abschnitten im Detail erläutert. ReSUS besteht aus

- einer Definition für ReSUS-Modelle. Diese legt die allgemeine Struktur, zulässige Modellierungselemente und Verbindungen sowie Einschränkungen fest. Darüber hinaus werden Konfigurationsinformationen, wie zum Beispiel Pfade zu Simulationskernen oder Eingabedaten, gespeichert.
- dem ReSUS Model Designer, einem graphischen Entwicklungswerkzeug zur Erstellung und Konfiguration von ReSUS-Modellen. Dieses Werkzeug wurde als Plug-In für Eclipse (Eclipse Foundation, 2018) in der Programmiersprache Java entwickelt. Über seine Funktionalität zur Bearbeitung von ReSUS-Modellen hinaus dient es auch als zentrales Element von ReSUS der Ausführung von weiteren Komponenten, wie zum Beispiel ReSUS Core oder dem Chart Tool.
- dem Sample Generator, einer Komponente zur Erzeugung der Eingangswerte.
- ReSUS Core, dem Simulator für ReSUS-Modelle.

- dem Analysewerkzeug zur Visualisierung und Auswertung der Simulationsergebnisse, Chart Tool.
- dem Werkzeug zur Konvertierung von Simulationsergebnissen in ein Tabellenformat, Export Tool. So lassen sich zum Beispiel Microsoft Excel-Dateien zur weiteren Verarbeitung in externen Programmen anlegen.

Die wissenschaftliche Arbeit mit ReSUS-Modellen unterteilt sich in drei Phasen. In der ersten, der Designphase, wird das ReSUS-Modell gestaltet oder angepasst. Die Simulationskerne werden konfiguriert und die Eingabedaten werden zum Beispiel mit Hilfe des Sample Generators entsprechend der vorgegebenen Verteilungen generiert. Input Provider werden konfiguriert, um diese Eingabedaten zu verwenden oder Werte aus vorangegangenen Result Convertern zu laden. In der zweiten Phase, der Simulationsphase, wird das ReSUS-Modell durch ReSUS Core simuliert. Für jeden Satz an Belegungen für die Eingabedaten (eine Realisierung) werden die Simulationskerne aufgerufen, ihre Ergebnisse extrahiert und gespeichert. Im letzten Schritt, der Auswertungsphase, werden die berechneten Simulationsergebnisse sowie die zugehörigen Eingabedaten entweder im Chart Tool ausgewertet, oder mit Hilfe des Export Tools exportiert, um weiterverarbeitet zu werden.

Aus einer Untersuchung zu Beginn des Projektes ging hervor, dass eine Vielzahl von Simulationskernen seine Konfiguration und Eingabedaten aus mehr oder weniger menschen-lesbaren Textdateien laden kann. Unabhängig von der verwendeten Kodierung ist ein Zugriff auf Textdateien, sowohl lesend als auch schreibend vergleichsweise einfach umzusetzen. Es wurde daher beschlossen die Modifikation von Textdateien als Schnittstelle für die Eingangsdaten zwischen ReSUS Core, dem Simulator von ReSUS, und den existierenden Simulationskernen, wie zum Beispiel PHAST zu verwenden.

ReSUS-Modelle bestehen aus ReSUS-Modellelementen und Verbindungen. ReSUS-Modellelemente besitzen zwei Arten von Konnektoren: Eingänge und Ausgänge. Verbindungen verbinden jeweils zwei ReSUS-Modellelemente an deren Konnektoren miteinander, genau einen Eingangs-Konnektor mit genau einem Ausgangs-Konnektor. ReSUS-Modelle sind somit gerichtete Graphen, bei denen die Kanten durch die (von Ausgangs-Konnektor zu Eingangs-Konnektor) gerichteten Verbindungen und die Knoten durch ReSUS-Modellelemente gegeben sind. Als weitere Einschränkung sind ReSUS-Modelle per Definition azyklisch, es erfolgt also keine iterative Kopplung verschiedener Kerne.

Zur Erzeugung der Eingabedaten dient der ReSUS Sample Generator. Diese Generierung findet in zwei Schritten statt: Im ersten Schritt, der Konfiguration, werden alle Größen, die Teil der probabilistischen Untersuchung sein sollen, konfiguriert. Im zweiten Schritt, der Erzeugung, wird die Anzahl an Realisierungen festgelegt und für jede Realisierung ein Wert für jede Eingangsgröße erzeugt.

Das ReSUS Chart Tool ist ein Werkzeug zur Durchführung von Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen. Zur grafischen Analyse ermöglicht das Chart Tool die Erzeugung von Liniendiagrammen, Histogrammen und Streudiagrammen. Für Liniendiagramme wird für nicht-stationäre Probleme auf der Ordinate in der Regel die Zeit gewählt, auf der Abszisse kann eine beliebige interessierende Größe ausgewählt werden. Das Chart Tool ist der Ausgangspunkt für Erweiterungen von ReSUS in Bezug auf die Sensitivitätsanalyse, speziell im Bereich der Visualisierung.

Zusätzlich zur Softwareentwicklung wurden auch die theoretischen Grundlagen für die probabilistische Sensitivitätsanalyse vorangetrieben. Mit solchen Analysen lässt sich quantitativ bestimmen, ob (und wie) sich die Unsicherheiten in den Eingangsdaten eines Simulationsmodells auf die Ergebnisse auswirken. Ausgestattet mit diesem Wissen, das einen Einblick in die internen Vorgänge des Simulationsmodells liefert, kann der Analyst sein Modellverständnis überprüfen und der Entscheidungsträger die Richtung zusätzlichen Forschungsbedarf bestimmen, sei es in Form einer detaillierten Abbildung physikalischer Prozesse im Modell oder in Form von gehobenen Ansprüchen an die Qualität der Eingangsdaten.

Besonders bei risikobasierten Metriken, die sich über mehrere Größenordnungen erstrecken, zeigt sich, dass die traditionell genutzte Korrelation zwischen Eingangs- und Ergebnisdaten, die man als Steigung einer Regressionsgeraden durch die dazugehörige Punktwolke erhält, nur eingeschränkte Aussagekraft besitzt. Varianzbasierte Sensitivitätsmaße, die auf nicht-lineare Regressionskurven zurückgreifen, bieten hier Alternativen. Hier wurden Verfahren um die Nutzung von Quasi-Zufallszahlen (wie die in ReSUS implementierte Sobol-Sequenz) erweitert, diese bieten verbesserte Konvergenzeigenschaften, da sie den Parameterraum nicht zufällig, sondern regelmäßig mit Werten füllen (Plischke u. a., 2017).

Eine Möglichkeit, Sensitivitätsmaße allgemein zu definieren, besteht darin, den erwarteten Zugewinn an Information zu messen, wenn man erfährt, dass ein Eingangsparameter einen bestimmten Wert erhält. Diese Information lässt sich z. B. an der Änderung der Lage- und Gestaltparameter der Ergebnisverteilung ablesen. Betrachtet man den bedingten Mittelwert als Maß, so erhält man den varianzbasierten Haupteffekt. Nutzt man dagegen momentenunabhängige Maße, die die Gesamtverteilung der Er-

gebnisgröße bevor und nachdem man den entsprechenden Eingangsparameterwert erfahren hat miteinander vergleichen, so hat man Maße, die man als Abstand zur Unabhängigkeit interpretieren kann. Für diese theoretischen Überlegungen wurden transformationsinvariante Maße (Borgonovo u. a., 2014) und ihre Einbettung in einen Copula-Kontext untersucht (Plischke u. Borgonovo, 2015). Weiterhin erfolgte eine Interpretation als geeigneter Score-Funktionen in der Informationswerttheorie (Value-Of-Information) (Borgonovo u. a., 2016). Eine Gesamtschau der Methoden findet sich in (Borgonovo u. Plischke, 2016).

Ohne geeignete Berechnungsverfahren sind diese theoretischen Überlegungen wenig praktikabel. So lag ein Fokus auf der Entwicklung geeigneter Schätzverfahren, mit denen sich Sensitivitätsmaße aus gegebenen Datensätzen extrahieren lassen. Die Anwendung gestaltet sich dann analog zu einer Korrelationsanalyse, nur dass eventuell größere Datensätze mit mehr Realisierungen benötigt werden, um einen gewünschten Grad der Genauigkeit der Schätzungen zu erreichen.

Ergebnisse

Die Entwicklung von ReSUS schafft komplementär zu den bereits existierenden Programmen zur Bewertung der Langzeitsicherheit ein Werkzeug, das auch in der Aus- und Weiterbildung eingesetzt werden und die Kommunikation mit der Öffentlichkeit unterstützen kann. Methoden zum Datenmanagement, zur Visualisierung und zur Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse bieten einen Mehrwert gegenüber den bisher verwendeten einzelnen THMC-Codes. Ein weiterer Mehrwert ergibt sich aus der Gestaltung des Workflows und aus der Nutzeroberfläche, die eine niedrige Einstiegsschwelle schaffen und damit auch einen Einsatz in Lehre, Aus- und Weiterbildung ermöglichen.

Für die Schätzung von Sensitivitätsmaßen wurde ein gemeinsamer Überbau entwickelt (Borgonovo u. a., 2016) und ein Vergleich unterschiedlicher Sensitivitätsverfahren zur Modellierung eines Wassereinzugsgebiets durchgeführt (Borgonovo u. a., 2017).

Literatur

[Altmaier u. a. 2006] Altmaier, M.; Neck, Volker; Denecke, Melissa A.; Yin, R.; Fanghänel, Thomas: Solubility of $\text{ThO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}(\text{Am})$ and the Formation of Ternary Th(IV) Hydroxide-Carbonate Complexes in $\text{NaHCO}_3\text{-Na}_2\text{CO}_3$ Solutions Containing 0–4 M NaCl. In: *Radiochimica Acta* 94 (2006), Januar, Nr. 9-11

- [Altmaier u. a. 2008] Altmaier, Marcus; Neck, Volker; Fanghänel, Thomas: Solubility of Zr(IV), Th(IV) and Pu(IV) Hydrous Oxides in CaCl₂ Solutions and the Formation of Ternary Ca-M(IV)-OH Complexes. In: *Radiochimica Acta* 96 (2008), Januar, Nr. 9-11
- [Apache Software Foundation 2018] Apache Software Foundation: *Apache Subversion*. <https://subversion.apache.org/> – Abgerufen am 31.01.2018
- [Appel u. a. 2015] Appel, Detlef; Kreusch, Jürgen; Neumann, Wolfgang: Darstellung von Entsorgungsoptionen. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2015 (1) – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Bechthold u. a. 2004] Bechthold, W.; Smailos, E.; Heusermann, S.; Bollingerfehr, W.; Bazargan Sabet, B.; Rothfuchs, T.; Kamlot, P.; Grupa, J.; Olivella, S.; Hansen, F.D.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS-II Project). 2004 (EUR 20621 EN) – Report
- [Bojanowski 2017] Bojanowski, Roman: *Probabilistische Modellierung hydrogeochemischer Prozesse mit dem Code PHAST und der Softwareplattform ReSUS*, Bachelorarbeit, 2017
- [Bollingerfehr 2011] Bollingerfehr, Wilhelm (Hrsg.): *Endlagerkonzepte: Bericht zum Arbeitspaket 5 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. Köln: GRS, 2011 (GRS 272)
- [Bollingerfehr u. a. 2012] Bollingerfehr, Wilhelm; Filbert, Wolfgang; Dörr, Sabine; Herold, Philipp; Lerch, Christian; Burgwinkel, Paul; Charlier, Frank; Thomauske, Bruno; Bracke, Guido; Kilger, Robert: *Endlagerauslegung und -optimierung: Bericht zum Arbeitspaket 6 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. Köln: Ges. für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), 2012 (GRS 281)
- [Borgonovo u. a. 2016] Borgonovo, Emanuele; Hazen, Gordon B.; Plischke, Elmar: A Common Rationale for Global Sensitivity Measures and Their Estimation. In: *Risk Analysis* 36 (2016), Nr. 10, S. 1871–1895
- [Borgonovo u. a. 2017] Borgonovo, Emanuele; Lu, Xuefei; Plischke, Elmar; Rakovec, Oldrich; Hill, Mary C.: Making the Most out of a Hydrological Model Dataset: Sensitivity Analyses to Open the Model Black-Box. In: *Water Resource Research* 53 (2017), Nr. 9, S. 7933–7950

- [Borgonovo u. Plischke 2016] Borgonovo, Emanuele; Plischke, Elmar: Sensitivity analysis: A review of recent advances. In: *European Journal of Operational Research* 248 (2016), Nr. 3, S. 869–887
- [Borgonovo u. a. 2014] Borgonovo, Emanuele; Tarantola, Stefano; Plischke, Elmar; Morris, Max D.: Transformations and invariance in the sensitivity analysis of computer experiments. In: *Journal of the Royal Statistical Society: Series B* 76 (2014), Nr. 5, S. 925–947
- [Bradbury u. a. 1998] Bradbury, Michael H.; Baeyens, Bart; Pearson, Frederick J.; Berner, Urs: Derivation of In Situ Opalinus Clay Porewater Compositions from Experimental and Geochemical Modelling Studies / Nagra. 1998 (97-07) – Forschungsbericht
- [Brewitz 1982] Brewitz, Wernt: Eignungsprüfung der Schachthanlage Konrad für die Endlagerung radioaktiver Abfälle / Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH - Institut für Tieflagerung. Neuherberg, 1982 (GSF-T136) – Forschungsbericht
- [Buhmann 1999] Buhmann, Dieter: *Das Programmpaket EMOS: ein Instrumentarium zur Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagern*. Köln: GRS, 1999 (GRS 159)
- [Börst u. a. 2000] Börst, Frank-Michael; Rimpler, Arndt; Scheib, Helmut: Strahlungsmessungen an Transport- und Lagerbehältern zur Beförderung von hochaktiven Glaskokillen aus der Wiederaufarbeitung und von bestrahlten Brennelementen. 2000 (BfS-ET-32/00) – Forschungsbericht
- [Ciavatta 1990] Ciavatta, Liberato: The Specific Interaction Theory in Equilibrium Analysis: Some Empirical Rules for Estimating Interaction Coefficients of Metal Ion Complexes. In: *Annali di Chimica* 80 (1990), S. 255–263
- [Eckhardt u. Rippe 2016] Eckhardt, Anne; Rippe, Klaus P.: *Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Zürich: vdf Hochschulverlag, 2016
- [Eclipse Foundation 2018] Eclipse Foundation: Desktop IDEs. <http://www.eclipse.org/ide/>. 2018 – Forschungsbericht – Abgerufen am 31.01.2018

- [Fellhauer u. a. 2010] Fellhauer, D.; Neck, Volker; Altmaier, Marcus; Lützenkirchen, Johannes; Fanghänel, Thomas: Solubility of Tetravalent Actinides in Alkaline CaCl_2 Solutions and Formation of $\text{Ca}_4[\text{An}(\text{OH})_8]^{4+}$ Complexes: A Study of $\text{Np}(\text{IV})$ and $\text{Pu}(\text{IV})$ under Reducing Conditions and the Systematic Trend in the $\text{An}(\text{IV})$ Series. In: *Radiochimica Acta* 98 (2010), Januar, Nr. 9-11
- [Fellhauer u. a. 2016] Fellhauer, David; Rothe, Jörg; Altmaier, Marcus; Neck, Volker; Runke, Jörg; Wiss, Thierry; Fanghänel, Thomas: $\text{Np}(\text{V})$ Solubility, Speciation and Solid Phase Formation in Alkaline CaCl_2 Solutions. Part I: Experimental Results. In: *Radiochimica Acta* 104 (2016), Januar, Nr. 6
- [Felmy u. a. 1989] Felmy, Andrew R.; Rai, Dhanpat; Schramke, Janet A.; Ryan, Jack L.: The Solubility of Plutonium Hydroxide in Dilute Solution and in High-Ionic-Strength Chloride Brines. In: *Radiochimica Acta* 48 (1989), Januar, Nr. 1-2
- [Filbert u. a. 1995] Filbert, Wolfgang; Engelmann, Heinz J.; Heda, M.; Neydeck, Jürgen: Direkte Endlagerung Ausgedienter Brennelemente (DE-AB) – Handhabungsversuche Zur Streckenlagerung / Deutsche Gesellschaft für den Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH. Peine, 1995 (T60) – Abschlussbericht
- [Fischer-Appelt u. Baltes 2010] Fischer-Appelt, Klaus; Baltes, Bruno: *Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen. Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik. Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“*. Köln: GRS, 2010 (GRS A - 3536)
- [Ghofrani 2016] Ghofrani, Javad: *Conceptualisation and Software Development of a Simulation Environment for Probabilistic Safety Assessments of Radioactive Waste Repositories*, Dissertation, 2016
- [GNS 2014] GNS: *Castor® HAW28M*. <https://www.gns.de/language=de/21535/castor-haw28m>, Dezember 2014
- [Graser u. a. 2015] Graser, Carl-Heinrich; Banik, Nidhu lal; Bender, Kerstin A.; Lagos, Markus; Marquardt, Christian M.; Marsac, Rémi; Montoya, Vanessa; Geckeis, Horst: Sensitive Redox Speciation of Iron, Neptunium, and Plutonium by Capillary Electrophoresis Hyphenated to Inductively Coupled Plasma Sector Field Mass Spectrometry. In: *Analytical Chemistry* 87 (2015), Oktober, Nr. 19, S. 9786–9794

- [Guillaumont u. a. 2003] Guillaumont, Robert; Fanghänel, Thomas; Fuger, Jean; Grenthe, Ingmar; Neck, Volker; Palmer, Donald A.; Rand, Malcolm H.: *Chemical thermodynamics*. Bd. 5: *Update on the Chemical Thermodynamics of Uranium, Neptunium, Plutonium, Americium and Technetium*. Amsterdam: Elsevier, 2003
- [Habibi 2016] Habibi, Ahmad: *Modellierung des Radionuklidtransportes durch das Gorleben-Deckgebirge auf Grundlage des Modellierungscodes RockFlow und des Modellanalysecodes RESUS*, Projektarbeit, 2016
- [International Atomic Energy Agency 2009] International Atomic Energy Agency: *Geological disposal of radioactive waste: technological implications for retrievability*. Wien: International Atomic Energy Agency, 2009 (IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.19)
- [Janberg u. Spilker 1998] Janberg, Klaus; Spilker, Harry: Status of the Development of Final Disposal Casks and Prospects in Germany. In: *Nuclear Technology* 121 (1998), Februar, Nr. 2, S. 136–147
- [Kitamura u. Kohara 2004] Kitamura, Akira; Kohara, Yukitoshi: Carbonate Complexation of Neptunium(IV) in Highly Basic Solutions. In: *Radiochimica Acta* 92 (2004), Januar, Nr. 9-11
- [Klein 2012] Klein, Rolf: *Laser welding of plastics*. Weinheim: Wiley-VCH, 2012
- [Klix u. a. 2011] Klix, Axel; Domula, Alexander; Fischer, Ulrich; Gehre, Daniel; Pereslavitsev, Pavel; Rovni, István: Test Facility for a Neutron Flux Spectrometer System Based on the Foil Activation Technique for Neutronics Experiments with the ITER TBM. In: *Fusion Engineering and Design* 86 (2011), Oktober, Nr. 9-11, S. 2322–2325
- [Li 2015] Li, Xiaoshuo: *Entwicklung der Softwareplattform RESUS: Repository Simulation, Uncertainty propagation and Sensitivity Analysis*. Clausthal-Zellerfeld, Dissertation, 2015
- [Léon Vargas u. Stahlmann 2016] Léon Vargas, Rocio P.; Stahlmann, Joachim: Thermal impact in the geometrical settings in deep geological repositories for HLW with retrievability. In: *Proceedings of Annual Waste Management Symposium /WM 2016*, 6.-10.03.2016, Phoenix, Arizona, USA. Phoenix, USA: WM Symposia, 2016
- [Maier 2014] Maier, Hans J.: Behälterdossier Pollux 10. 2014 – ENTRIA-Dossier

- [Marti 2016] Marti, Michèle: Risikoansichten. Wie Merkmale der Person, der Quelle und des Rahmens die Art und Weise beeinflussen, wie Personen die mit der Entsorgung von radioaktiven Abfällen verbundenen Risiken wahrnehmen und bewerten. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2016 (5) – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Meleshyn u. Noseck 2012] Meleshyn, Artur; Noseck, Ulrich: *Radionuclide inventory of vitrified waste after spent nuclear fuel reprocessing at La Hague: basic issues and current state in Germany*. Köln: GRS, 2012 (GRS 294)
- [Minhans u. a. 2008] Minhans, Anne (Hrsg.); Sailer, Michael (Hrsg.); Schmidt, G. (Hrsg.): *Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland: Anhang Langzeitsicherheitsnachweis*. Köln: GRS, 2008
- [Montarnal u. a. 2005] Montarnal, Philippe; Dimier, Alain; Deville, Estelle; Adam, Erwan; Gaombalet, Jérôme; Bengaouer, Alain; Loth, Laurent; Chavant, Clément: Coupling Methodology Within The Software Platform Alliances. In: *International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering*. Barcelona, 2005
- [Neck u. a. 2007] Neck, Volker; Altmaier, Marcus; Fanghänel, Thomas: Solubility of Plutonium Hydroxides/Hydrous Oxides under Reducing Conditions and in the Presence of Oxygen. In: *Comptes Rendus Chimie* 10 (2007), Oktober, Nr. 10-11, S. 959–977
- [Neck u. Kim 2001] Neck, Volker; Kim, Jae I.: Solubility and Hydrolysis of Tetravalent Actinides. In: *Radiochimica Acta* 89 (2001), Januar, Nr. 1, S. 1–16
- [Parkhurst u. Appelo 1999] Parkhurst, David L.; Appelo, C. A. J.: User's guide to PHREEQC (Version 2). A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations / U.S. Geological Survey : Earth Science Information Center. 1999 (99-4259) – USGS Numbered Series – 312 S.
- [Peiffer u. a. 2011] Peiffer, Frank; McStocker, Brigitta; Gründler, Detlef; Ewig, Falk; Thomauske, Bruno; Havenith, Andreas; Kettler, John: *Abfallspezifikation und Mengengerüst*. Köln: GRS, 2011 (GRS 278)

- [Pelowitz u. a. 2013] Pelowitz, D. B.; Goorley, T.; James, M.; Booth, Thomas E.; Brown, F.; Bull, J.; Cox, Lawrence J.; Durkee, J.; Elson, J.; Fensin, Michael L.; Forster, R. A.; Hendricks, J.; Hughes, H. G.; Johns, R.; Kiedrowski, B.; Martz, Roger; Mashnik, S. G.; Mckinney, Gregg; Prael, R.; Sweezy, Jeremy; Waters, L.; Wilcox, T.; Zukaitis, T.: MCNP6 User's Manual / Los Alamos National Laboratory. 2013 (LA-CP-13-00634) – Forschungsbericht
- [Petrov u. a. 2017] Petrov, Vladimir G.; Fellhauer, David; Gaona, Xavier; Dardenne, Kathy; Rothe, Jörg; Kalmykov, Stepan N.; Altmaier, Marcus: Solubility and Hydrolysis of Np(V) in Dilute to Concentrated Alkaline NaCl Solutions: Formation of Na-Np(V)-OH Solid Phases at 22 °C. In: *Radiochimica Acta* 105 (2017), Januar, Nr. 1, S. 1–20
- [Pitzer 1991] Pitzer, Kenneth S. (Hrsg.): *Activity coefficients in electrolyte solutions*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 1991
- [Plischke u. Borgonovo 2015] Plischke, Elmar; Borgonovo, Emanuele: Copula-based Sensitivity Measures of Computer Experiments. In: *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems. Proceedings of the 25th European Safety and Reliability Conference held in Zürich, Switzerland, September 7-10, 2015* Bd. 2015. London: CRC Press, 2015, 2595–2602
- [Plischke u. a. 2017] Plischke, Elmar; Mara, Thierry; Tarantola, Stefano: Advanced Sensitivity Methods using Random Balance Design. (2017) – In Vorbereitung
- [Pönitz u. a. 2017] Pönitz, Erik; Walther, Clemens; Hassel, Thomas: Calculation of Dose Rates at the Surface of Storage Containers for High-Level Radioactive Waste. In: International Radiation Protection Association (Hrsg.): *Proceedings of the 14th International Congress of the International Radiation Protection Association*. Kapstadt, 2017, 1932–1938
- [Quintessa 2011] Quintessa: *AMBER 5.4 Reference Guide*. 2011
- [Ren 2017] Ren, Bainan: *Untersuchungen zur Modellierung des Deckgebirges eines Salzstocks*, Studienarbeit, 2017 – In Bearbeitung

- [Röhlig u.a. 2014] Röhlig, Klaus-Jürgen; Walther, Clemens; Bach, Friedrich-Wilhelm; Brunnengräber, Achim; Budelmann, Harald; Chaudry, Saleem; Eckhardt, Anne; Geckeis, Horst; Grunwald, Armin; Hassel, Thomas; Hocke, Peter; Lux, Karl-Heinz; Mengel, Kurt; Metz, Volker; Ott, Konrad; Plischke, Elmar; Riemann, Moritz; Smeddinck, Ulrich; Schreurs, Miranda A.; Stahlmann, Joachim: Memorandum zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe. https://www.entria.de/fileadmin/entria/Dokumente/ENTRIA_Memorandum_140430.pdf. Hannover, 2014 – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Spilker u. Hüggenberg 1991] Spilker, Harry; Hüggenberg, Roland: Description of the German Concept of Final Storage Cask. In: *International Journal of Radioactive Materials Transport* 2 (1991), Januar, Nr. 1-3, S. 67–75
- [Stahlmann u. a. 2015] Stahlmann, Joachim; Mintzlaff, Volker; Léon Vargas, Rocio P.; Institut für Grundbau und Bodenmechanik (Hrsg.): Generische Tiefenmodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung. Braunschweig, 2015 (3) – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Sweezy 2003] Sweezy, Jeremy E.: MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. 2003 (LA-UR-03-1987) – Forschungsbericht
- [U.S. Department of Energy 2015] U.S. Department of Energy: Bottle Manikin Absorption (BOMAB) Phantom. In: *Bottle Manikin Absorption (BOMAB) Phantom* (2015)
- [VDMA 1979] VDMA: *VDMA Kenndaten für die Verarbeitung Thermoplastischer Kunststoffe, Teil 1: Thermodynamik*. Bd. Teil 1. München: C. Hanser Verlag, 1979
- [Wagner u. Wilhelm 2018] Wagner, Philipp G.; Wilhelm, Joscha: *Probabilistische Analysen von Grundwasserströmungen für räumlich verteilte Eingangsparameter*, Masterarbeit, 2018

[Ziegenhagen u. a. 2005] Ziegenhagen, Jürgen; Bollingerfehr, Wilhelm; Skrzypek, Jürgen; Schlickenrieder, L; Chapman, Neil A.; Nirvin, Bosse; Sjöblom, Rolf; Svemar, Christer: Untersuchung der Möglichkeiten und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager / DBE Technology GmbH/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Peine, 2005 (Z2.2.7/WS 1006/8489-2) – Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz – 104 S.

5.5 Vertikalprojekt 5 - Endlagerung in tiefe geologische Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit

Das Vertikalprojekt befasste sich komplementär zur bereits vom Bund geförderten Endlagerforschung mit ausgewählten Aspekten der Entsorgungsoption Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit („wartungsfreie Tiefenlagerung“). Folgende übergeordnete Zielsetzungen werden verfolgt:

- Für die mit der Formulierung von Bewertungsgrundlagen befassten Transversalprojekte wurden Informationen zu den konzeptionellen Grundlagen der Option sowie zu ausgewählten Aspekten der Sicherheit in der Etappe nach Verschluss des Endlagerbergwerks (Langzeitsicherheit) bereitgestellt.
- Die Entwicklung hinsichtlich des Verständnisses und der numerischen Modellierung sicherheitsrelevanter thermischer, hydraulischer, chemischer und mechanischer Prozesse (einschließlich Zweiphasenströmung, „TH2MC“) wird vorangetrieben.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Die naturwissenschaftlich-technischen Grundlagen und die konzeptionellen Aspekte der Option wurden in einer Form beschrieben, die als Arbeits- und Diskussionsgrundlage sowohl für Spezialisten als auch für Vertreter nicht-technischer Disziplinen geeignet ist (Unterauftrag Öko-Institut Darmstadt): In einem ENTRIA-Arbeitsbericht (Schmidt u. Kallenbach-Herbert, 2017) wurde damit ein Beitrag zu einer Gesamtschau der drei in ENTRIA zu behandelnden Optionen geleistet. Der Bericht soll zur interdisziplinären Verständigung über diese Optionen beitragen und umfasst die Aspekte
 - Sicherheitsphilosophie und die Aufgabenstellung bei der Endlagerung,
 - Beschreibung des Endlagersystems und der im Endlager ablaufenden Tätigkeiten,
 - Safety Case und Langzeitsicherheitsanalyse,
 - Proliferationsüberwachung,
 - wesentliche Unterschiede zwischen der Option ohne und mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit.

- Es erfolgte eine numerische Analyse fluiddynamisch relevanter Prozesse für Endlager in Tonstein- und in Steinsalzformationen, die Relevanz dieser Prozesse (einschließlich Gasbildung) für die Barrierenintegrität wurde untersucht. Es wurden Laborarbeiten zur Stützung des Prozessverständnisses und zur Weiterentwicklung von Stoffgesetzen durchgeführt (AP 5.1 und 5.2 sowie AP 6.7mod, LfDG).
- Auf der Basis der in den Arbeitspaketen 5.1 und 5.2 berechneten Fluidströme wurde das Migrationsverhalten von Radionukliden modelliert (AP 5.3, IELF-ES).
- Es erfolgten Labor- und Modellierungsarbeiten zu hydrogeochemischen Prozessen im Wirtsgestein Steinsalz und im Deckgebirge (AP 5.3, IELF-MGS).

Die Ergebnisse zu sicherheitsrelevanten Prozessen wurden dem TP 4 zur Unterstützung der Entwicklung von Bewertungsgrundlagen für eine vergleichende Risikobewertung zur Verfügung gestellt. Das Projekt leistete damit einen Beitrag zu den interdisziplinär vernetzenden Themenkreisen „Performance und radiologische Konsequenz“ sowie „Sicherheits- und Risikowahrnehmung“.

5.5.1 Arbeitspakete 5.1 und 5.2 (LfDG): Globalmodelle, Funktionalmodelle, Lokalmodelle – Werkzeuge bei der Analyse des langfristigen Verhaltens von verschlossenen Endlagersystemen im Salinar- bzw. Tonsteingebirge

Im Rahmen der in den Arbeitspaketen 5.1 und 5.2 durchgeführten Arbeiten sind neben geomechanischen verstärkt fluiddynamische Prozesse untersucht worden, die einerseits während der Betriebsphase und andererseits während der Nachbetriebsphase innerhalb von Endlagerbergwerken sowie in der umgebenden Wirtsgesteinsformation zu erwarten sind, und zwar für die beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge.

Im Hinblick auf die Langzeitsicherheitsanalyse für ein Endlagersystem in einer tiefen geologischen Gebirgsformation ist das großräumige Systemverhalten mit den zentralen Kompartimenten Endlagerbergwerk, Nahfeld, Fernfeld und Biosphäre für einen Zeitraum von einer Million Jahren rechnerisch zu simulieren. Dabei müssen die relevanten im Endlagersystem ablaufenden physikalischen Prozesse insbesondere im Hinblick auf mechanische, hydraulische und thermische Vorgänge sowie deren räumlich-zeitliche Wechselwirkung angemessen berücksichtigt werden.

Physikalische Modellierung und numerische Simulation der im Salinar- und Tonsteingebirge relevanten Prozesse setzen einerseits ein tiefgehendes Prozessverständnis, andererseits aber auch leistungsfähige sowie prozessbezogen validierte Simulatoren voraus. Ein derartiger Simulator ist der im Rahmen des Forschungsprojektes „Kopplung der Softwarecodes FLAC3D und TOUGH2 in Verbindung mit in-situ, laborativen und numerischen Untersuchungen zum thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Tongestein unter Endlagerbedingungen“ (Lux u. a., 2015) am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal entwickelte FTK-Simulator. Zentrale Komponente ist eine Schnittstelle zur Kommunikation der beiden Simulatoren FLAC3D (ITASCA Consulting Group, 2013) und TOUGH2 (Pruess u. a., 1999) (FTK steht für „FLAC-TOUGH-Kopplung“). Der FTK-Simulator kann gleichermaßen herangezogen werden

- zur Verbesserung des Prozessverständnisses zu den in einem Endlagerbergwerk sowie im umgebenden Wirtsgestein ablaufenden TH2M-gekoppelten physikalischen Prozessen und
- zur Verbesserung des Systemverständnisses zum langfristigen Verhalten eines Endlagersystems im Salinargebirge bzw. im Tonsteingebirge unter Berücksichtigung der ablaufenden insbesondere fluid-dynamischen Prozesse, die sich in verschiedenen Teilbereichen des Endlagersystems aus den ablaufenden TH2M-gekoppelten physikalischen Prozessen ergeben und die in diesen Teilbereichen in ihrer zeitlichen Entwicklung auch beeinflusst werden durch in anderen Endlagersystembereichen ablaufende Prozesse.

Zur Verbesserung des Systemverständnisses im Hinblick auf die Langzeitentwicklung eines tiefeingeologischen Endlagersystems ist als Grundlage für die mit dem FTK-Simulator durchgeführten rechnerischen Simulationen ein generisches Endlagersystem bestehend aus dem Endlagerbergwerk und der umgebenden Wirtsgesteinsformation definiert worden, das dann in ein geeignetes Berechnungsmodell überführt worden ist (vgl. Abschnitt 3.2.1). Das Berechnungsmodell ist in einer Gesamtansicht in Abbildung 5.15 sowie in einer auf den Einlagerungsbereich fokussierten Detailansicht in Abbildung 5.16 dargestellt. Der Typus dieses räumlich weit ausgedehnten Berechnungsmodells wird im Folgenden als Globalmodell bezeichnet. Diese Globalmodelle können auch als Weiterentwicklung der so genannten Kompartimentmodelle gesehen werden, die bislang Grundlage für die Analyse der Radionuklidfreisetzung sind.

Das im Globalmodell abgebildete generische Endlagersystem umfasst entsprechend Abbildung 5.15 bzw. 5.16 im Detail das Bergwerk mit meh-

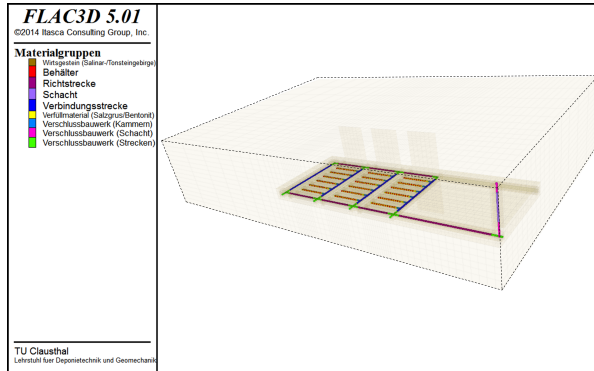


Abbildung 5.15: Gesamtansicht des Globalmodells für ein generisches Endlagersystem im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge.

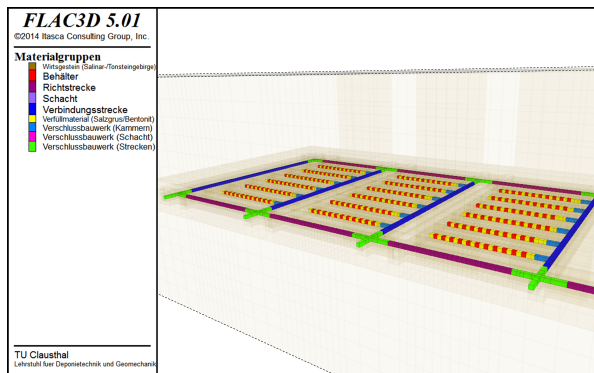


Abbildung 5.16: Detailansicht des Einlagerungsbereichs im Globalmodell für ein generisches Endlagersystem im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge.

renen Einlagerungskammern einschließlich der eingelagerten Abfallbehälter, mit Infrastrukturstrecken und Tagesschächten, mit Kammer-, Strecken- und Schachtverschlussbauwerken und schließlich mit dem Versatzmaterial sowie die umgebende Wirtsgesteins- bzw. Barrierenformation (im Sicherheitskonzept ggf. als einschlusswirksamer Gebirgsbereich vorgesehen) und damit die wesentlichen Komponenten des Nahfeldes eines Endlagersystems.

Mit Blick auf den mit den umfangreichen und komplexen Simulationen verbundenen Berechnungsaufwand ist die räumliche Ausdehnung des Globalmodells auf ein als angemessen repräsentativ erachtetes Maß begrenzt worden, so dass im Globalmodell nicht die gesamte vom Bundesamt für Strahlenschutz für Deutschland prognostizierte zu entsorgende Menge an hoch radioaktiven Abfällen abgebildet worden ist. Zur weiteren Reduzierung des Berechnungsaufwandes ist das Globalmodell zudem charakterisiert durch einen einheitlichen, vom jeweiligen Wirtsgestein abhängigen geometrisch einfachen Zuschnitt des Endlagersystems, der mit seiner regelmäßigen Anordnung eher auf großräumig homogene Gebirgsverhältnisse fokussiert ist, wie sie z. B. im Tonsteingebirge oder in Schichtensalzlagerstätten zu erwarten sind. Komplexere geotektonische Verhältnisse, wie sie z. B. für den Standort Gorleben in einer Salzstock-Lagerstätte vorliegen, sind hier nicht betrachtet worden.

Als Variationen des in Abbildung 5.15 und 5.16 dargestellten Globalmodells sind drei weitere Globalmodelle untersucht worden, und zwar

- stellvertretend für eine süddeutsche Opalinustonformation eine Konfiguration mit geringerer Wirtsgesteinsmächtigkeit,
- eine Modell mit einer senkrecht ausgerichteten, unentdeckten Störungszone mit gegenüber dem Wirtsgestein erhöhter Permeabilität und Anschluss an das Deckgebirge, wobei
 - einerseits die Störungszone bei der Auffahrung des Streckensystems durchörtert worden ist oder
 - andererseits die Störungszone nicht identifiziert wurde und erst einige Meter oberhalb der Einlagerungszone ansteht,

und

- ein Modell mit einem nicht identifizierten, 10 m unterhalb des mittleren Einlagerungsfeldes anstehenden Laugennest ohne primär vorhandene hydraulische Verbindung zur Einlagerungssohle.

Im Rahmen der mit den Globalmodellen durchgeführten rechnerischen Simulationen finden neben relativ komplexen funktionalen Beziehungen zur realitätsnahen physikalischen Modellierung von im Nahfeld des

Entsorgungsbergwerks ablaufenden, insbesondere fluiddynamischen und thermischen Prozessen für die Modellierung einiger ausgewählter, insbesondere mechanischer Prozesse auch vereinfachende und auf die generalisierte Modellierung fundamentaler Prozessabläufe fokussierte funktionale Beziehungen Verwendung. Diese vereinfachenden funktionalen Beziehungen werden im Folgenden als Funktionalmodelle bezeichnet.

Mit Funktionalmodellen werden mit stärkerer oder weniger starker Abstraktion endlagerrelevante Prozesse beschrieben, die die potenzielle Radionuklidmigration aus dem Endlager in die Biosphäre durch die geologischen und/oder geotechnischen Barrieren beeinflussen. Dazu gehören als sicherheitstechnisch relevante Prozesse

- Konvergenz,
- Strömung von Gas und wässrigen Lösungen im Endlagerbergwerk und gegebenenfalls auch in der umgebenden Wirtsgesteinsformation,
- Quelldruckentwicklung,
- Sekundärporositätsentwicklung und
- Sekundärpermeabilitätsentwicklung.

Im Hinblick auf Sekundärporositäts- und Sekundärpermeabilitätsentwicklung sind sowohl die geologische Barriere wie auch die geotechnischen Barrieren zu betrachten. Die im Rahmen des Forschungsprojektes ENTRIA entwickelten Funktionalmodelle sind Lux u. a. (2018) und Zhao (2017) zu entnehmen. Exemplarisch ist hier nur das im Rahmen der Arbeiten in VP 5.1 entwickelte Funktionalmodell Konvergenz dargestellt:

$$\dot{K}(x, t, p_i(t), T(t)) = \dot{K}_0 \cdot f_{loc}(x) \cdot f_p(p_i(t)) \cdot f_T(T(t)) \cdot f_t(t)$$

mit
 \dot{K}_0

stationäre Konvergenzrate des unversetzten Hohlraums bei einem konstanten Innendruck (= Referenzdruck p_{ref}), einer konstanten Temperatur (= Referenztemperatur T_{ref}) und einer isotropen primären Gebirgsspannung p_G am Referenzort in a^{-1} ,

$$f_{loc}(x)$$

zeitlich konstanter ortsabhängiger Faktor zur Berücksichtigung der Ortsabhängigkeit der stationären Konvergenzrate bei Referenzbedingungen (dimensionslos),

$$f_p(p_i(t)) = 1 - \left(\frac{p_i(t) - p_{ref}}{p_G - p_{ref}} \right)^n$$

Faktor zur Berücksichtigung der Abhängigkeit der stationären Konvergenzrate vom in der Strecke wirkenden Innendruck $p_i(t) = \alpha(t) \cdot p_{Fl}(t) + p_{\Phi}(t)$ zum Zeitpunkt t (dimensionslos),

$$f_T(T(t)) = \exp \left(a \cdot (T(t) - T_{ref})^b \right)$$

Faktor zur Berücksichtigung der Abhängigkeit der stationären Konvergenzrate von der Temperatur $T(t)$ zum Zeitpunkt t (dimensionslos) und

$$f_t(t)$$

Faktor zur Berücksichtigung von transienten Effekten auf die stationäre Konvergenzrate zum Zeitpunkt t (dimensionslos).

Die Berücksichtigung von Wärmeentwicklung und Gasbildung erfolgt dagegen nicht in Form eines abstrahierenden Funktionalmodells, sondern als zeitlich-räumliche Einwirkung, die im FTK-Simulator unmittelbar vom Anwender vorgegeben werden kann, so dass keine abstrahierenden Funktionalmodelle benötigt werden. Die Daten zur korrosionsbedingten Gasbildung sind in Abstimmung mit den Bearbeitern der ENTRIA-Arbeitspakete 4.4 sowie 6.5 angesetzt worden. Die Daten zur Wärmeentwicklung der Einlagerungsbehälter sind Filbert (2004) entnommen worden.

Die die physikalischen Prozesse mit Blick auf eine Implementierung in ein Globalmodell vereinfachend abbildenden Funktionalmodelle müssen grundsätzlich situativ bzw. konfiguratativ validiert werden – entweder anhand von laborativen Untersuchungen oder durch den Vergleich mit realitätsnäheren Modellierungsansätzen, hier in Verbindung mit der Simulation des TH2M-Verhaltens räumlich begrenzter ausgewählter Endlagersystem-Teilmodelle. Dadurch ist sicherzustellen, dass die die physikalischen Prozesse stark abstrahierenden Funktionalmodelle die im Endlager tatsächlich ablaufenden Prozesse sowohl qualitativ wie auch quantitativ in hinreichender Qualität abbilden können. Die im Rahmen des Vergleichs der Funktionalmodelle mit realitätsnäheren Modellierungsansätzen verwendeten Berechnungsmodelle, die prozessorientiert typische Endlager-

system-Teilmodelle abbilden, werden im Folgenden als Lokalmmodelle bezeichnet.

Lokalmmodelle sind zudem auch Berechnungsmodelle, mit denen das Prozessverständnis zu den in unterschiedlichen Endlagerkompartimenten und Endlagerkomponenten ablaufenden physikalischen Prozessen verbessert werden soll, z. B. anhand retrospektiver Analyse ausgewählter Labor- und Feldversuche, wie dem in Bechthold u. a. (1999) dokumentierten TSDE-Experiment. Abbildung 5.17 zeigt die Versuchsanordnung des TSDE-Experiments, Abbildung 5.18 zeigt das für den FTK-Simulator erstellte Berechnungsmodell. Eine detaillierte Beschreibung sowie Ergebnisse der durchgeführten retrospektiven Analyse sind in Blanco Martín u. a. (2016) sowie Lux u. a. (2017d) dokumentiert.

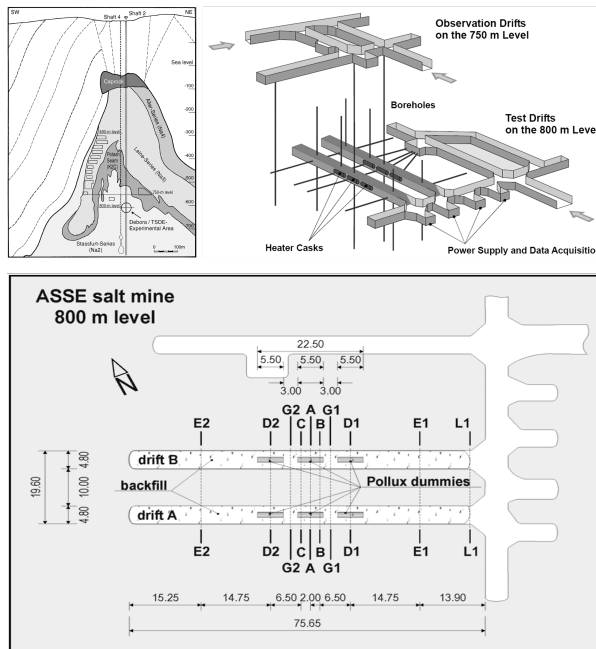


Abbildung 5.17: Schnittdarstellung des ehemaligen Salzbergwerks Asse mit Markierung des Versuchsstandortes sowie schematische Übersicht über die Versuchsanordnung mit Positionierung der Messquerschnitte sowie der Messbohrlöcher (Bechthold u. a., 1999).

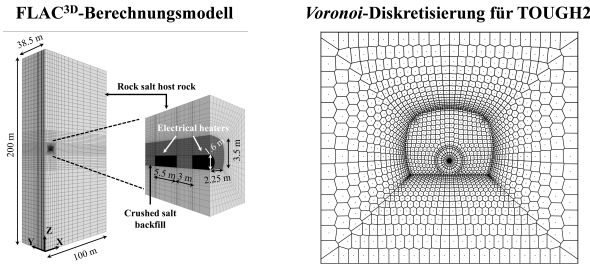


Abbildung 5.18: FLAC3D-Berechnungsmodell mit Angabe der wesentlichen Abmessungen und Detailansicht der für TOUGH2 transformierten Voronoi-Diskretisierung (Blanco Martín u. a., 2016).

Lokalmodelle sind im Vergleich zu Globalmodellen räumlich begrenzt, weisen aber zur Ermittlung von charakteristischen mechanischen, hydraulischen oder thermischen Zustandsgrößen und Prozessabläufen eine erheblich feinere Diskretisierung auf als Globalmodelle. Durch die feinere Modelldiskretisierung kann einerseits tatsächlich die Geometrie der relevanten Grubenbaue (Einlagerungskammern, Infrastrukturstrecken, Abdichtungsbereiche) mit gegebenenfalls diskret modellierten Abfallbehältern, Versatz und/oder geotechnischen Barrieren realitätsnäher abgebildet werden, um so die ablaufenden physikalischen Prozesse genauer analysieren zu können, andererseits finden aber auch lokal größere Spannungs-, Temperatur- oder Fluiddruckgradienten durch die feinere Modelldiskretisierung stärkere Berücksichtigung in der numerischen Simulation. Weiterhin berücksichtigen die in den rechnerischen Simulationen mit Lokalmodellen eingesetzten physikalisch-mathematischen Beziehungen zur Modellierung der im Endlager ablaufenden Prozesse deutlich mehr Eigenschaften und Einflussfaktoren und sind daher grundsätzlich realitätsnäher, aber in der numerischen Simulation auch signifikant komplexer als die in den Globalmodellen eingesetzten und mitunter stark abstrahierten Funktionalmodelle.

Da im vorliegenden Abschnitt die Analyse des langfristigen Verhaltens von verschlossenen Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge im Vordergrund steht, werden im Folgenden ausschließlich einige ausgewählte Ergebnisse der mit den Globalmodellen durchgeführten Simulationen diskutiert. Weitere Globalmodell-Simulationsergebnisse sind Lux u. a. (2017a,b,c) zu entnehmen. Hinsichtlich der Dokumentation der im Rahmen der ENTRIA-Arbeiten mit Lokalmodellen durchgeführ-

ten Simulationen zur Validierung des FTK-Simulators durch Simulator-Benchmark mit dem Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) bzw. mit dem Beijing Research Institute of Uranium Geology (BRIUG) und retrospektive Analyse ausgewählter Feldversuche sowie zur Ableitung verschiedener Funktionalmodelle wird an dieser Stelle verwiesen auf Blanco Martín u. a. (2015, 2016); Lux u. a. (2017d) und Zhao (2017).

Visualisierung fluiddynamischer Prozesse in einem verschlossenen Endlager

Vorbemerkung. Im Hinblick auf die Verbesserung des Prozess- und Systemverständnisses zu den in einem Endlager im Salinar- oder Tonsteingebirge ablaufenden physikalischen Prozessen und ihrer räumlich-zeitlichen Wechselwirkungen anhand von numerischen Simulationen ist eine angemessene Darstellung der Simulationsergebnisse von großer Bedeutung. Aus diesem Grund bietet der FTK-Simulator unterschiedliche Möglichkeiten der Ergebnisvisualisierung, z. B.

- die flächenhafte Darstellung von verschiedenen physikalischen Größen zu ausgewählten Zeitpunkten,
- die Darstellung der zeitlichen Entwicklung von verschiedenen physikalischen Größen an ausgewählten Positionen und
- die vektorielle Darstellung von Fluidbewegungen (Porenwasser bzw. Salzlösung sowie Gas) im Endlagerbergwerk sowie im umgebenden Wirtsgestein zu ausgewählten Zeitpunkten.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Visualisierung der Ergebnisse genutzt, um Einflüsse von Parametervariationen (z. B. Korrosionsrate oder Permeabilität der geologischen bzw. geotechnischen Barrieren) oder der Berücksichtigung geotektonisch angelegter Schwächezonen (Störungszone mit erhöhter Permeabilität oder Annahme eines endlagernahen Laugennests) auf die in einem Endlagersystem im Salinar- oder Tonsteingebirge ablaufenden fluiddynamischen Prozesse zu analysieren.

Simulation der Bau- und Betriebsphase. Im Rahmen der rechnerischen Simulation zum Systemverhalten des Referenz-Endlagersystems im Salinar- sowie im Tonsteingebirge werden mit Blick auf die fluiddynamischen Prozessabläufe zunächst der Schacht und dann nachfolgend die einzelnen Streckenabschnitte im Infrastrukturbereich und in den Einlagerungsbereichen sukzessive aufgefahren.

Die Auffahrungssequenz beginnt mit der Auffahrung des Schachtes, anschließend wird die Richtstrecke zwischen dem Schacht und den Einlagerungsfeldern aufgefahren. Mit Blick auf die Betriebssicherheit bei gleichzeitiger Erkundung der lokalen geologischen Verhältnisse werden im Anschluss dann zunächst die Umfahungsstrecken (= außen liegende Richt- und Verbindungsstrecken) und anschließend die inneren Verbindungsstrecken aufgefahren. Erst nach der Auffahrung der letzten Verbindungsstrecke und der Feststellung der grundsätzlichen Eignung des geplanten Einlagerungsfeldes insgesamt für die tatsächliche Einlagerung von Abfällen wird mit der Auffahrung der Einlagerungsstrecken begonnen. Die Auffahrung der Einlagerungsstrecken beginnt zunächst in dem am weitesten vom Schacht entfernten Einlagerungsfeld und dort mit der am weitesten vom Schacht entfernten Einlagerungsstrecke. Anschließend werden im gleichen Einlagerungsfeld die beiden nächsten Einlagerungsstrecken aufgefahren. Um die Offenhaltungszeit der Einlagerungsstrecken gering zu halten, wird anschließend im Rückbauverfahren die zuerst aufgefahrene Einlagerungsstrecke mit insgesamt 11 Abfallbehältern des Typs POLLUX-10 im Salinargebirge bzw. des Typs POLLUX-3 im Tonsteingebirge bestückt, die verbleibenden Hohlräume dieser Strecke mit Salzgrus bzw. mit Bentonit versetzt und zuletzt die Einlagerungsstrecke mit einem Dammbauwerk verschlossen. Für die Abfalleinlagerung und den Versatz der Einlagerungsstrecke sowie die Errichtung des Dammbauwerks wird in der rechnerischen Simulation ein Zeitraum von insgesamt 30 Wochen angesetzt.

Nachdem die erste Einlagerungsstrecke verschlossen ist, wird eine weitere Einlagerungsstrecke aufgefahren. Diese Betriebssequenz wiederholt sich in analoger Art und Weise, wobei stets zwei bis drei Einlagerungsstrecken offen gehalten werden. Nachdem die vierte Einlagerungsstrecke im ersten Einlagerungsfeld wieder verschlossen worden ist, wird die erste Strecke im zweiten Einlagerungsfeld aufgefahren. Anschließend wird die vorstehend beschriebene Betriebssequenz fortgesetzt, bis auch die letzte Einlagerungsstrecke im ersten Einlagerungsfeld verschlossen und die dritte Einlagerungsstrecke im zweiten Einlagerungsfeld aufgefahren worden ist. Danach werden zeitlich parallel zu Belegung und anschließendem Verschluss der ersten Einlagerungsstrecke im zweiten Einlagerungsfeld die Umfahungsstrecken des ersten Einlagerungsfeldes versetzt und durch Verschlussbauwerke verschlossen, da diese Umfahungsstrecken zukünftig nicht mehr benötigt werden. Anschließend setzt sich die Betriebssequenz wie beschrieben fort auch im dritten Einlagerungsfeld, das den geringsten Abstand zum Schacht aufweist. Nachdem auch dieses dritte Einlagerungsfeld mit Abfallbehältern belegt und verschlossen

ist, werden zuletzt die Richtstrecke zum Schacht und dann der Schacht selbst versetzt, wobei an den in Abbildung 5.15 dargestellten Bereichen Verschlussbauwerke angeordnet werden. Insgesamt ergibt sich aus der vorstehenden Beschreibung für das Referenz-Endlagersystem ein Betriebszeitraum von etwa 19 Jahren.

Ausgewählte Simulationsergebnisse. *Referenz-Endlagersystem im Salinargebirge / Grundsituation: Temperaturentwicklung*

Aus der durchgeführten Simulation zum langfristigen Verhalten des Referenz-Endlagersystems entsprechend Abbildung 5.15 und 5.16 ist zu ersehen, dass mit Beginn der Einlagerung der Abfallbehälter die Temperaturen in den bereits belegten Einlagerungsstrecken zunächst sehr stark ansteigen, während der Temperaturanstieg in den Bereichen der Einlagerungssohle, in denen noch gearbeitet wird, nur relativ moderat ausfällt. Für den ausgewählten Zeitpunkt $t \approx 9,91$ a nach Beginn der Betriebsphase ist dieser Sachverhalt exemplarisch in Abbildung 5.19 dargestellt. Der maximal zulässige Temperaturwert auf der Einlagerungssohle wird für das Referenz-Endlagersystem im Salinargebirge mit ca. 190 °C ausgewiesen und entsprechend der sequentiellen Belegung der Einlagerungsstrecken an verschiedenen Positionen der Einlagerungsfelder zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht. Den Simulationsbefunden folgend reduzieren sich die Temperaturen in den Einlagerungsstrecken und ihrem unmittelbaren Umfeld allerdings wenige Monate nach Einlagerung der Abfallbehälter schon wieder, da einerseits die zerfallsbedingte Wärmeenergie entsprechend der guten Wärmeleitfähigkeit des Salzgebirges großräumig verteilt wird und andererseits die Wärmeleistung der Abfallbehälter im Lauf der Zeit abnimmt. Dieses Simulationsergebnis wird durch in (Bechthold u. a., 1999) beschriebene Messdaten des TSDE-Experiments bestätigt, da auch dort die gemessenen Temperaturen ihre Maximalwerte bereits wenige Monate nach Aktivierung der elektrischen Erhitzer erreichen und danach eine allmähliche Abkühlung trotz sogar konstanter Wärmeleistung der elektrischen Erhitzer zu verzeichnen war, insbesondere unmittelbar an der Erhitzer-Oberfläche.

Etwa 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers stellen sich die Temperaturen im gesamten Berechnungsmodell wieder auf dem Niveau der primären Gebirgstemperaturen ein. Damit ist nach diesem Zeitraum temperaturbezogen die transiente Phase der Endlagerentwicklung beendet. Sind auch die technogen induzierten mechanischen und hydraulischen Prozesse innerhalb dieses Zeitraums abgeschlossen, unterliegt das End-

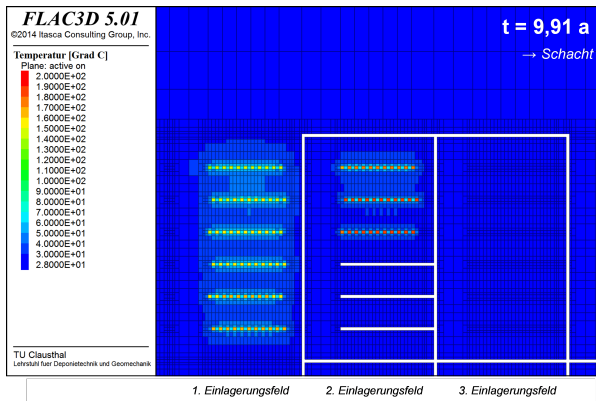


Abbildung 5.19: Räumlich-zeitliche Temperaturentwicklung in der Einlagerungssohle des Referenz-Endlagersystems ohne Überfahrungssohle für die Wirtsgesteinsinformation Salinargebirge.

lager in seiner weiteren Entwicklung allein geogenen Einwirkungen und Prozessen.

Referenz-Endlagersystem im Salinargebirge / Grundsituation: Fluidodynamische Entwicklung ohne primär vernetzte hydraulische Wegsamkeiten

Neben der Temperaturentwicklung im Gebirge haben auch die im Endlagerbergwerk sowie im umgebenden Salinargebirge ablaufenden fluid-dynamischen Prozesse eine signifikante Relevanz bei der Bewertung des langfristigen Endlagersystemverhaltens. Aus diesem Grund sind in Lux u. a. (2017d) für ausgewählte Zeitpunkte einige Simulationsergebnisse zu der diese fluidodynamischen Prozesse charakterisierenden Sole- bzw. Gasmigration im Streckensystem sowie im umgebenden Salinargebirge vorgestellt worden. Diese Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Bei Annahme eines nur begrenzten, mit dem Salzgrusversatz in das Endlagerbergwerk eingebrachten Feuchteangebots, das in dieser Simulation mit ca. 23 m^3 Porenwasser pro Einlagerungsstrecke angesetzt worden ist, sowie bei einer Behälterkorrosionsrate von $1 \text{ } \mu\text{m/a}$ ergibt sich ein vollständiger Verbrauch der Lösung der Lösung und somit ein Ende der korrosionsbedingten Gasbildung etwa 20.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers, wodurch die fluidodynamischen Prozesse im Endlager und im umgebenden Salinargebirge allmählich zum Erliegen kommen. Dieser Zeitraum gilt insbesondere auch für die druckgetriebene Gasinfiltration aus dem Streckensystem in das umliegende Gebirge. Abbildung 5.20

zeigt die räumliche Ausdehnung der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Infiltrationszone, charakterisiert durch einen gegenüber der angesetzten Anfangsbedingung ($p_g = p_{\text{hydrostatisch}}$) erhöhten Porengasdruck. Die Infiltrationszone dringt entsprechend Abbildung 5.20 für den Fall des nur begrenzten Feuchteangebots bis zum Ende der korrosionsbedingten Gasbildung etwa 35 m in die Firstbereiche der Einlagerungsstrecken ein.

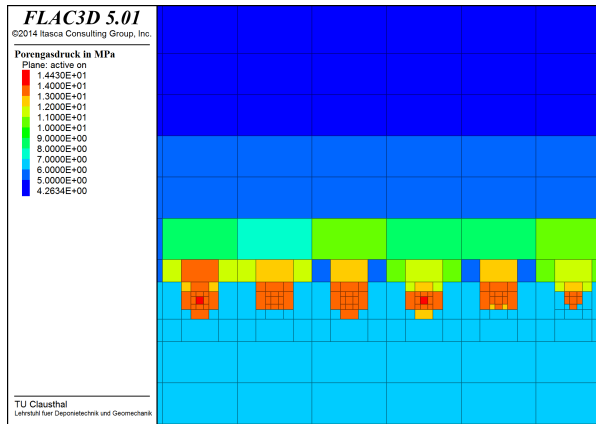


Abbildung 5.20: Gasinfiltrationszone im Salinargebirge um die Einlagerungsstrecken des 2. Einlagerungsfeldes sowie im Salinargebirge oberhalb des 2. Einlagerungsfeldes zum Zeitpunkt $t=20.000$ a nach Verschluss des Endlagers.

Bei Annahme eines unbegrenzten Feuchteangebots und einer weiterlaufenden Korrosion / Gasbildung propagiert die Infiltrationsfront des Gases im Salinargebirge dagegen in Richtung der oberen Berandung des Berechnungsmodells fort und erreicht im Rahmen der hier betrachteten Simulation den Salzspiegel bzw. das Deckgebirge entsprechend Abbildung 5.21 etwa $t=80.000$ a nach Verschluss des Endlagers.

Zur weiteren Erläuterung der ablaufenden fluiddynamischen Prozesse werden in Lux u. a. (2017d) für den Fall des unbegrenzten Feuchteangebots zur korrosionsbedingten Gasbildung ortsbezogen für ausgewählte Beobachtungspunkte innerhalb des Endlagerbergwerks entsprechend Abbildung 5.22 (links) sowie im Salinargebirge oberhalb der Einlagerungssohle entsprechend Abbildung 5.22 (rechts) die zeitabhängigen Entwicklungen unterschiedlicher physikalischer Größen (Salzgrusporosität, Flüssigkeitssättigungsgrad, Gassättigungsgrad, Porengasdruck, Temperatur sowie Flüssigkeits- und Gasmigrationsraten) diskutiert. Besonders her-

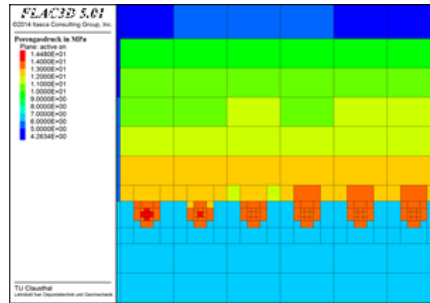


Abbildung 5.21: Gasinfiltrationszone im Salinargebirge um die Einlagerungsstrecken des 2. Einlagerungsfeldes sowie im Salinargebirge oberhalb des 2. Einlagerungsfeldes zum Zeitpunkt $t=80.000$ a nach Verschluss des Endlagers.

vorzuheben sind hier die zeitabhängigen Entwicklungen der Salzgrusporosität entsprechend Abbildung 5.23, des Porengasdrucks entsprechend Abbildung 5.24 sowie der Temperatur entsprechend Abbildung 5.25. Die Darstellung der zeitabhängigen Entwicklungen umfasst den Zeitraum zwischen einem Jahr nach Verschluss des Endlagers und 1.000.000 Jahren nach Verschluss des Endlagers.

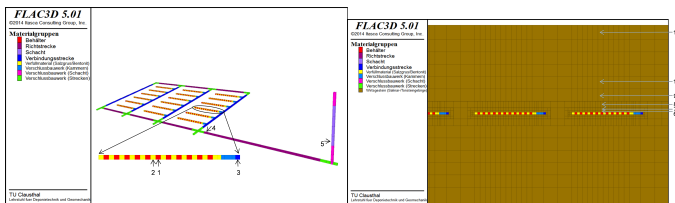


Abbildung 5.22: Positionierung der ausgewählten Beobachtungszonen zur Analyse der zeitlichen Entwicklung unterschiedlicher physikalischer Größen innerhalb des Grubengebäudes (links) bzw. im Salinargebirge oberhalb des Grubengebäudes (rechts).

Aus Abbildung 5.23 ist zu ersehen, dass sich die zeitlichen Entwicklungen der Salzgrusporosität für verschiedene Beobachtungspunkte deutlich voneinander unterscheiden. Während die Salzgrusporosität in der Beobachtungszone 1, die einen Abfallbehälter inklusive des umgebenden Salzgrusversatzes repräsentiert, bereits ein Jahr nach Verschluss des Endla-

gers von initial $\phi_0=35\%$ auf $\phi \approx 22\%$ zurückgegangen ist, hat sie sich in den anderen Beobachtungszonen bis zu diesem Zeitpunkt nur sehr wenig verändert. Aufgrund der fortschreitenden Salzgruskompaktion wird in der Beobachtungszone 1 eine Salzgrusporosität von $\phi \approx 5\%$ bereits etwa 200 Jahre nach Verschluss des Endlagers erreicht, während die Salzgrusporosität in den anderen Beobachtungszonen zu diesem Zeitpunkt noch $\phi > 20\%$ beträgt.

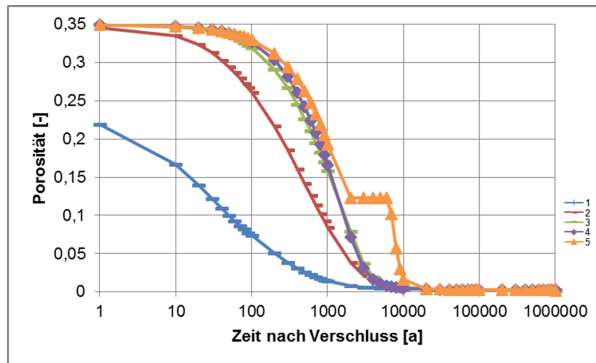


Abbildung 5.23: Zeitliche Entwicklung der Salzgrusporosität in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes.

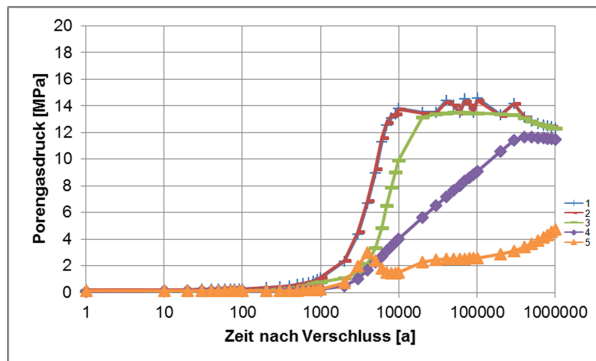


Abbildung 5.24: Zeitliche Entwicklung des Porengasdrucks in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes

Mit zunehmender Salzgruskompaktion baut sich im Versatzmaterial ein immer größerer Stützdruck auf, der der weiteren Salzgruskomparti-

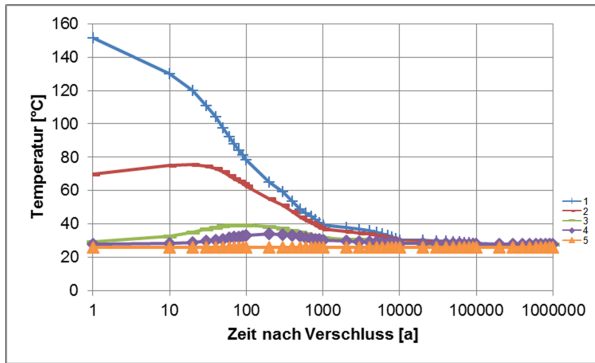


Abbildung 5.25: Zeitliche Entwicklung der Temperatur in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes.

on entgegenwirkt. Dieser Effekt ist aufgrund der anfänglich temperaturbedingt lokal intensiveren Salzgruskompektion besonders ausgeprägt in der Berechnungszone 1. Aus diesem Grund erreicht die Salzgrusporosität eine dem umgebenden Salinargebirge entsprechende geogene Porosität von $\phi \approx 0,2\%$ in allen Beobachtungszonen erst mehrere 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers.

Die Salzgruskompektion führt allerdings nicht nur zu einem ansteigenden Stützdruck im Salzgrusversatz, sondern auch zu einem konvergenzbedingten Fluidruckaufbau im Porenraum des Salzgrusversatzes, so dass der Porenfluiddruck etwa 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers den primären Gebirgsdruck erreicht. Dieser Sachverhalt ist auch aus Abbildung 5.24 zu ersehen.

Abbildung 5.25 zeigt die Temperaturentwicklung in den 5 ausgewählten Beobachtungszonen innerhalb des Grubengebäudes. Es ist zu ersehen, dass in der Beobachtungszone 1 Temperaturen von deutlich über 100 °C erreicht werden, wodurch die Streckenkonvergenz und die damit einhergehende Salzgruskompektion intensiviert wird. In den anderen Beobachtungszonen bleiben die Temperaturen unterhalb von 100 °C. Die erreichten Maximaltemperaturen hängen wie erwartet von der Entfernung der Beobachtungszone von den Wärme produzierenden Abfallbehältern ab. Nach etwa 10.000 Jahren erreichen die Temperaturen im gesamten Berechnungsmodell wieder nahezu die primäre Gebirgstemperatur.

Referenz-Endlagersystem im Tonsteingebirge / Grundsituation: Temperaturentwicklung

Es bestehen drei signifikante Unterschiede zwischen dem Referenz-Endlagersystem im Salinargebirge und dem Referenz-Endlagersystem im Tonsteingebirge, die Einfluss auf die Temperaturentwicklung haben, und zwar:

- die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität der beiden Wirtsgesteinsformationen sind unterschiedlich,
- die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität der in den beiden Wirtsgesteinsformationen verwendeten Versatzmaterialien (Salzgrus im Salinargebirge bzw. Bentonit im Tonsteingebirge) sind unterschiedlich und
- die Beladung und damit auch die Wärmeleistung der Einlagerungsbehälter (POLLUX-10 im Salinargebirge bzw. POLLUX-3 im Tonsteingebirge) sind unterschiedlich.

Aufgrund dieser Unterschiede zeigen die in Lux u. a. (2017d) dokumentierten Simulationsergebnisse, dass im Tonsteingebirge vornehmlich bedingt durch die dortige Verwendung von Behältern des Typs POLLUX-3 die Temperaturen in den bereits mit Abfallbehältern belegten Einlagerungsstrecken wie zu erwarten deutlich weniger stark ansteigen als im Salinargebirge. Die maximale Temperatur auf der Einlagerungssohle wird für das Referenz-Endlagersystem im Tonsteingebirge mit ca. 100 °C ausgewiesen und entsprechend der sequentiellen Belegung der Einlagerungsstrecken an verschiedenen Positionen der Einlagerungsfelder zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht. Anschließend reduzieren sich die Temperaturen in den Einlagerungsstrecken und in ihrem unmittelbaren Umfeld wieder, da einerseits die aus dem radioaktiven Zerfall resultierende Wärmeenergie entsprechend der Wärmeleitfähigkeit des Gebirges großräumig verteilt wird und andererseits die Wärmeleistung der Abfallbehälter im Lauf der Zeit abnimmt.

Etwa 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers sind die Temperaturen im gesamten Berechnungsmodell wieder auf dem Niveau der primären Gebirgstemperaturen.

Referenz-Endlagersystem im Tonsteingebirge / Grundsituation: Fluiddynamische Entwicklung mit primär vernetzten hydraulischen Wegsamkeiten

Neben den Temperaturentwicklungen im Gebirge und insbesondere den im Bentonitversatz bzw. Tonsteingebirge erreichten Maximaltemperaturen wird ein weiterer signifikanter Unterschied zwischen den beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge ersichtlich, wenn die hydraulische Situation im Umfeld der Einlagerungsstrecken verglichen wird. Während das Salinargebirge um die Einlage-

rungsstrecken in den ersten Jahrtausenden nach dem Verschluss des Endlagerbergwerks aufgrund der primären Impermeabilität des Salinargebirges weder eine Flüssigkeits- noch eine Gasmigration aufweist, tritt im Tonsteingebirge schon unmittelbar nach der Auffahrung der Strecken eine Sickerströmung von Porenwasser aus dem Tonsteingebirge in das Endlagerbergwerk hinein auf, die induziert wird durch den in die offenen und unter Atmosphärendruck stehenden Strecken gerichteten hydraulischen Gradienten. Aus Abbildung 5.26 ist zu ersehen, dass die Migrationsrate des Porenwassers allerdings mit $\dot{Q}_l \approx 0,44 \frac{l}{a \cdot m^2}$ (Liter pro Jahr und Quadratmeter Querschnittsfläche) während der Offenhaltung der Strecken aufgrund der sehr niedrigen hydraulischen Durchlässigkeit des Tonsteingebirges von $K = 10^{-20} m^2$ nur relativ gering ist. Mit dem Versatz der Strecken mit dem zum Einbauzeitpunkt nur zu 18 % wassergesättigten Bentonitversatz intensiviert sich die Porenwassermigration (entgegen der Erwartung) zunächst erheblich auf eine Migrationsrate von $\dot{Q}_l \approx 5,5 \frac{l}{a \cdot m^2}$ kurz nach Einbau des Bentonitversatzes. Grund hierfür ist der im nur teilgesättigten Bentonitversatz vorhandene Kapillardruck, durch den der in die versetzten Strecken gerichtete hydraulische Gradient für die Flüssigphase signifikant erhöht wird. Mit der allmählichen Aufsättigung des Bentonitversatzes reduziert sich der Kapillardruck und damit auch der hydraulische Gradient für die Flüssigphase, so dass die Porenwassermigration in ihrer Intensität dann wieder abklingt, bis der Zutritt von Porenwasser in die versetzten Strecken zum Zeitpunkt $t=1.000$ a nach Verschluss des Endlagers nahezu vollständig zum Erliegen gekommen ist.

Die numerischen Simulationen zeigen, dass nach dem Verschluss der Strecken zudem im Tonsteingebirge auch eine aufgrund des Dichteunterschieds zwischen Poren gas und Porenwasser vornehmlich nach oben gerichtete Gasströmung auftritt. Dabei wird zunächst die in dem beim Einbau nur teilgesättigten Bentonitversatz vorhandene Porenluft durch das zutretende Porenwasser komprimiert und ausgepresst. Im Zeitraum zwischen $t=1.000$ a und $t=10.000$ a nach Verschluss des Endlagers gewinnen allerdings die korrosionsbedingte Gasbildung und der damit verbundene Gasdruckaufbau in den Einlagerungsstrecken zunehmend an Bedeutung für das fluiddynamische Verhalten des Referenz-Endlagersystems. Die Gasbildung in den Einlagerungsstrecken resultiert in einer zunehmend intensiveren Verdrängung des in den Porenräumen des Versatzmaterials enthaltenen Porenwassers, so dass die Flüssigkeitssättigung wieder abnimmt, begleitet durch einen geringfügigen Anstieg des Kapillardrucks. Erst nach Ende der korrosionsbedingten Gasbildung in den Einlagerungsstrecken wird dieser Kapillardruck wieder abgebaut. Ebenso wie bei der

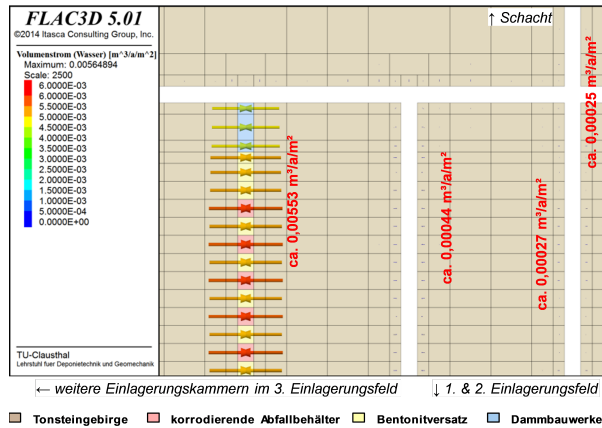


Abbildung 5.26: Porenwassermigration in der Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t \approx 15,31$ a nach Beginn der Betriebsphase.

Darstellung der Simulationsergebnisse zum Referenz-Endlagersystem im Salinargebirge werden im Folgenden auch für das Referenz-Endlagersystem im Tonsteingebirge zur weiteren Erläuterung der ablaufenden fluid-dynamischen Prozesse für ausgewählte Beobachtungspunkte innerhalb des Endlagerbergwerks sowie in der Wirtsgesteinsformation oberhalb der Einlagerungssohle entsprechend Abbildung 5.20 die zeitabhängigen Entwicklungen von relevanten physikalischen Größen erläutert, hier der Temperatur entsprechend Abbildung 5.27, des Wassersättigungsgrades entsprechend Abbildung 5.28 und des Porengasdrucks entsprechend Abbildung 5.29. Die Darstellung der zeitabhängigen Entwicklungen umfasst dabei den Zeitraum zwischen 1 Jahr nach Verschluss des Endlagers und 400.000 Jahren nach Verschluss des Endlagers.

Aus Abbildung 5.27 ist zu ersehen, dass in der hier betrachteten Simulation die Beobachtungszone 1, die einen Behälter und den umgebenden Bentonitversatz repräsentiert, bereits 1 Jahr nach Verschluss des Endlagers eine Temperatur von knapp unterhalb von 100 °C aufweist, die in der Folgezeit kontinuierlich abnimmt. Die Temperaturen in den anderen Beobachtungszonen bleiben sogar deutlich unterhalb von 100 °C. Somit findet keine Verdampfung des Porenwassers statt, sondern der Wassersättigungsgrad nimmt entsprechend Abbildung 5.28 durch den Porenwasserzutritt aus dem umgebenden Tonsteingebirge sogar allmählich zu, bis etwa zum Zeitpunkt $t=1.000$ a nach Verschluss des Endlagers eine Flüssig-

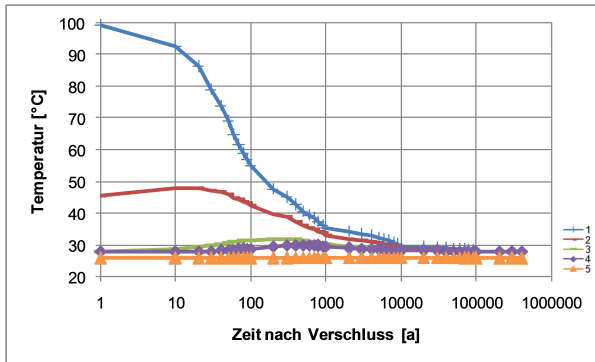


Abbildung 5.27: Zeitliche Entwicklung der Temperatur in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes.

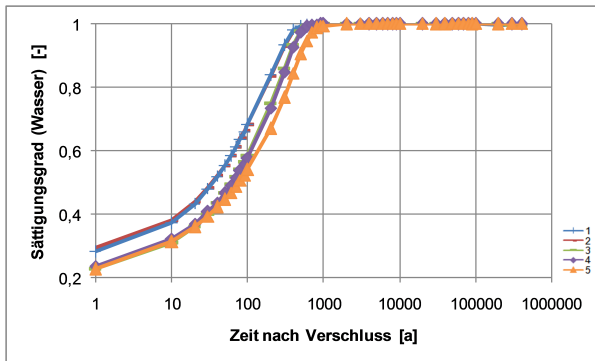


Abbildung 5.28: Zeitliche Entwicklung des Wassersättigungsgrades in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes.

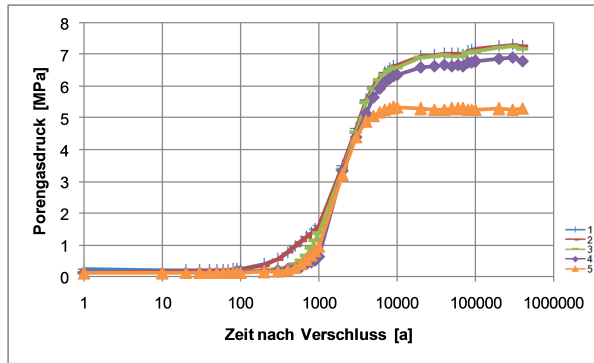


Abbildung 5.29: Zeitliche Entwicklung des Porengasdrucks in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes.

keitssättigung von $S_l \approx 99,9$ % erreicht wird. Der Zutritt des Porenwassers in das versetzte Streckensystem sowie die fortschreitende korrosionsbedingte Gasbildung führen zu einem allmählichen Anstieg des Porengasdrucks. Dieser erreicht entsprechend Abbildung 5.29 etwa 5.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers das Niveau des hydrostatischen Drucks mit $p_g \approx 6$ MPa. Anschließend steigt der Porengasdruck korrosionsbedingt noch etwas weiter an bis zu einem Maximalwert von $p_g \approx 7,1$ MPa, wodurch sich ein aus den Strecken in das umgebende Tonsteingebirge gerichteter Gasdruckgradient ergibt, der in einem Abströmen des Korrosionsgases in das umgebende Tonsteingebirge resultiert.

Das in die Wirtsgesteinsformation eindringende Porengas breitet sich aufgrund der im Tonsteingebirge schon im unverritzten Zustand vorhandenen vernetzten Porenräume in der Wirtsgesteinsformation aus, wobei die bevorzugte Ausbreitungsrichtung aufgrund des Dichteunterschieds zwischen Porengas und Porenwasser aufwärts gerichtet ist. In dieser Simulation erreicht die sich aufwärts bewegende Gasfront den oberen Modellrand und damit das Deckgebirge allerdings bis zum Ende der korrosionsbedingten Gasbildung nicht, wie aus dem in Abbildung 5.30 dargestellten Vertikalschnitt durch die Mitte des 2. Einlagerungsfeldes für den Zeitpunkt $t=300.000$ a nach Verschluss des Endlagers (= Ende der korrosionsbedingten Gasbildung) zu ersehen ist. In Abbildung 5.30 ist der Gebirgsbereich mit einer Flüssigkeitssättigung $S_l < 100$ % rot eingefärbt. In diesen Gebirgsbereich hat sich das bei der Behälterkorrosion entstehende Gas bis zum Ende der korrosionsbedingten Gasbildung ausgebreitet. Der Abstand zwischen der Oberkante dieses Gebirgsbereichs und der Modell-

oberkante beträgt zu diesem Zeitpunkt noch etwa 60 m. Obwohl die korrosionsbedingte Gasbildung zu diesem Zeitpunkt beendet ist, induziert der Dichteunterschied zwischen Poren gas und Porenwasser in der Folge eine weitere Propagation der Gasfront, allerdings mit signifikant reduzierter Propagationsrate.

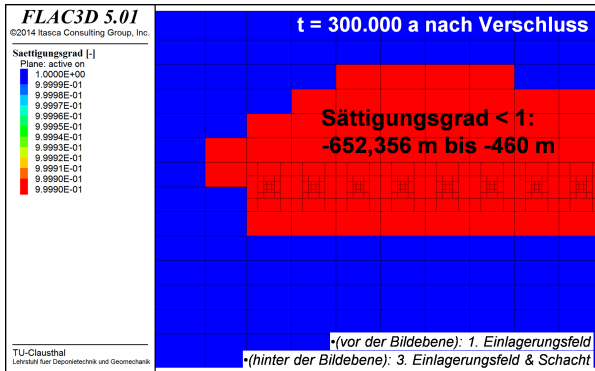


Abbildung 5.30: Flüssigkeitssättigung in den Einlagerungsstrecken sowie im Tonsteingebirge oberhalb des 2. Einlagerungsfeldes zum Zeitpunkt $t=300.000$ a nach Verschluss des Endlagers.

Sensitivitätsanalysen / Ausgewählte Simulationsergebnisse: Vorbemerkung

Im Rahmen der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sind diverse Globalmodell-Variationssimulationen für die beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge durchgeführt worden. An dieser Stelle können aus Platzgründen nur einige ausgewählte und besonders prägnante Simulationsergebnisse dieser Variationen grafisch dargestellt und entsprechend diskutiert werden. Für weitere Simulationsergebnisse wird auf Lux u. a. (2017d) verwiesen.

Mit Blick auf die thermischen Prozesse ist zunächst anzumerken, dass bei den meisten Globalmodell-Variationssimulationen die Wärmeleistung der Abfallbehälter analog zu den beiden vorstehend dokumentierten Simulationen angesetzt worden ist. Obwohl die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität der Versatzmaterialien und der umgebenden Wirtsgesteine nicht konstant sind, sondern als Funktionen von Porosität, Temperatur und/oder Flüssigkeitssättigung in Zeit und Raum variieren können, gibt es nur geringe Unterschiede zwischen den Simulationsergebnissen der beiden vorstehend diskutierten Simulationen und

den zugehörigen Variationssimulationen hinsichtlich der zeitlich-räumlichen Temperaturentwicklung. Dieser Befund deutet darauf hin, dass das Systemverhalten von Endlagersystemen im Salinar- oder Tonsteingebirge relativ robust gegenüber Änderungen der Wärmeleitfähigkeiten und der spezifischen Wärmekapazitäten ist, zumindest sofern sich diese Änderungen in der Größenordnung bewegen, wie sie sich aus den angesetzten funktionalen Zusammenhängen zwischen Wärmeleitfähigkeit bzw. spezifischer Wärmekapazität und Porosität, Temperatur und / oder Flüssigkeitssättigung ergeben.

Größere Unterschiede zwischen den Simulationen lassen sich mit Blick auf die fluiddynamischen Prozesse erkennen, wenn die in diesem Kontext relevanten Materialeigenschaften variiert werden, insbesondere die Korrosionsrate der Abfallbehälter, aber für das Endlager im Tonsteingebirge auch die primäre Permeabilität des Bentonits oder der geologischen Barriere. Auch der Ansatz einer Störungszone mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit oder der Ansatz eines primären horizontal oder vertikal gerichteten hydraulischen Gradienten im Tonsteingebirge beeinflussen die fluiddynamischen Prozesse im Endlagersystem. Für die fluiddynamischen Prozesse in einem Endlagersystem im Salinargebirge sind die Krieeigenschaften des Wirtsgesteins besonders relevant.

Sensitivitätsanalysen / Ausgewählte Simulationsergebnisse: Annahme einer ausbleibenden Behälterkorrosion

In einem Szenario, bei dem die Behälterkorrosion und die damit einhergehende korrosionsbedingte Gasbildung durch z. B. eine spezielle Abfallbehälterbehandlung wie etwa das Aufbringen einer korrosionsbeständigen Lackierung auf der Behälteroberfläche unterbunden werden, sind die Simulationsergebnisse in den ersten Jahrzehnten und Jahrhunderten zwar noch ähnlich zu den Simulationsergebnissen der beiden Basis-Simulationen. Nach Ende der Salzgruskompektion bzw. nach vollständiger Aufsättigung des Bentonits und Einstellung eines Porendrucks auf dem Niveau des primären Porendruckniveaus kommen allerdings alle Fluidmigrationsprozesse zum Erliegen. Ein advektiv getragener Radionuklidtransport ist somit nicht mehr möglich, ein diffusiv getragener Radionuklidtransport dagegen weiterhin schon.

Sensitivitätsanalysen / Ausgewählte Simulationsergebnisse: Annahme einer 100-fach erhöhten Behälterkorrosionsrate

Liegt eine gegenüber den Basis-Simulationen 100-fach erhöhte Behälterkorrosionsrate vor, so ergibt sich eine intensivere korrosionsbedingte Gasbildung und somit auch ein stärkerer Anstieg des Porengasdrucks, allerdings auch ein signifikant früheres Ende der Behälterkorrosion be-

reits 3.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers. Im Tonsteingebirge ergeben sich entsprechend Abbildung 5.31 Porengasdrücke von bis zu $p_g \approx 15$ MPa. Diese höheren Gasdrücke resultieren ihrerseits in höheren Gasdruckgradienten und damit auch in höheren Gasmigrationsraten. In Abbildung 5.32 werden im Streckensystem für den Zeitpunkt $t=1.000$ a nach Verschluss des Endlagers Gasmigrationsraten von etwa $\dot{Q}_g \approx 2.000 \frac{N-l}{a \cdot m^2}$ ausgewiesen, die somit ungefähr 45-mal größer sind als die für den gleichen Zeitpunkt berechnete Gasmigrationsrate in der Basis-Simulation.

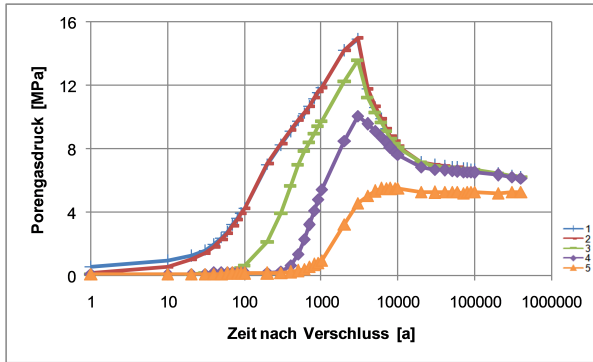


Abbildung 5.31: Zeitliche Entwicklung des Porengasdrucks in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes im Tonsteingebirge bei Annahme einer 100-fach erhöhten Behälterkorrosionsrate.

Sensitivitätsanalysen / Ausgewählte Simulationsergebnisse: Annahme einer 100-fach erhöhten Permeabilität der geotechnischen Barrieren

Sind die Permeabilitäten der geotechnischen Barrieren aufgrund unzureichender Einbauqualität signifikant erhöht, so überschreitet der Porengasdruck in den Einlagerungsstrecken und den weiteren Strecken der Einlagerungssohle aufgrund der geringeren Strömungswiderstände im Tonsteingebirge den hydrostatischen Druck und im Salinargebirge den primären Gebirgsdruck nicht mehr oder nur noch in geringem Maße. Fluidmigrationen treten in diesem Fall verstärkt entlang des Strecken- und Schachtsystems auf, weniger in der umgebenden Wirtsgesteinsformation. Abbildung 5.33 zeigt diesen Sachverhalt für das Endlager im Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t=10.000$ a nach Verschluss des Endlagers.

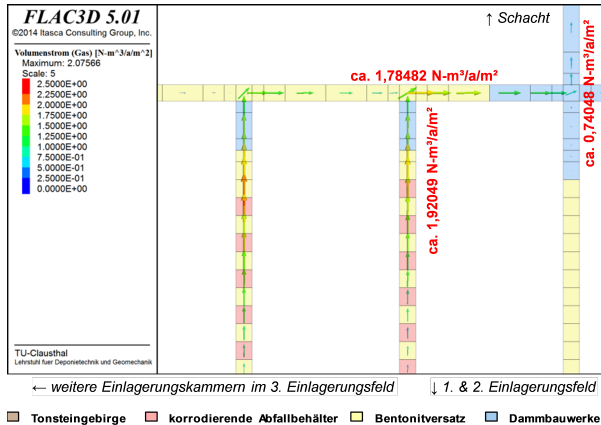


Abbildung 5.32: Porengasmigration innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t=1.000$ a nach Verschluss des Endlagers im Tonsteingebirge.

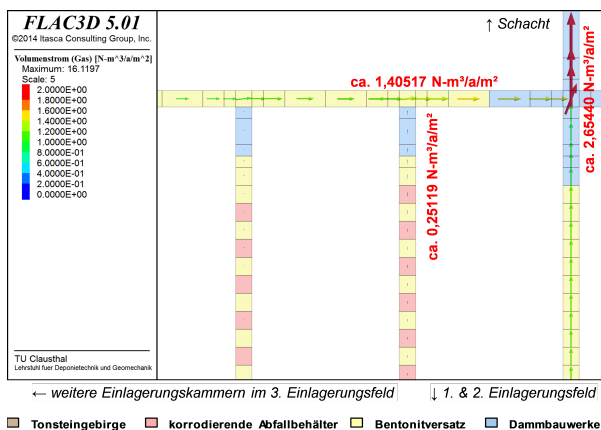


Abbildung 5.33: Porengasmigration innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t=10.000$ a nach Verschluss des Endlagers im Tonsteingebirge.

Sensitivitätsanalysen / Ausgewählte Simulationsergebnisse: Annahme einer 100-fach geringeren Permeabilität der geologischen Barriere für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

Ebenso wie in der vorherigen Variation finden auch in der hier betrachteten Variation Fluidmigrationen vornehmlich entlang des Strecken- und Schachtsystems auf, allerdings werden im Maximum deutlich höhere Porendrücke erreicht, da die geotechnischen Barrieren nicht so permeabel sind wie in der vorherigen Variation.

Abbildung 5.34 zeigt die zeitabhängige Entwicklung des Porengasdrucks in den Beobachtungszonen 1-5. Es ist zu ersehen, dass im Maximum ein Porengasdruck von etwa $p_g \approx 11,7$ MPa ausgewiesen wird. Es fällt allerdings auch auf, dass der Porengasdruck den hydrostatischen Druck erst etwa 50.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers erreicht, also deutlich später als in der zugehörigen Basis-Simulation. Ursache dafür ist die geringere Tonsteinpermeabilität, durch die die Aufsättigung des versetzten Streckensystems verzögert wird. Abbildung 5.35 zeigt die zugehörige zeitabhängige Entwicklung des Wassersättigungsgrades.

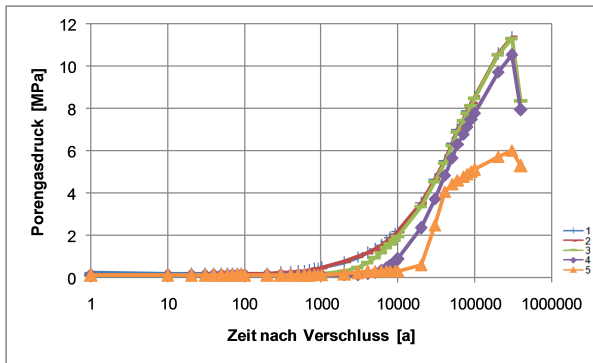


Abbildung 5.34: Zeitliche Entwicklung des Porengasdrucks in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes im Tonsteingebirge.

Aufgrund der geringeren Tonsteinpermeabilität dringt das Porengas trotz des höheren Porengasdrucks bis zum Ende der Behälterkorrosion auch deutlich weniger weit in das Tonsteingebirge ein. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 5.36 dargestellt.

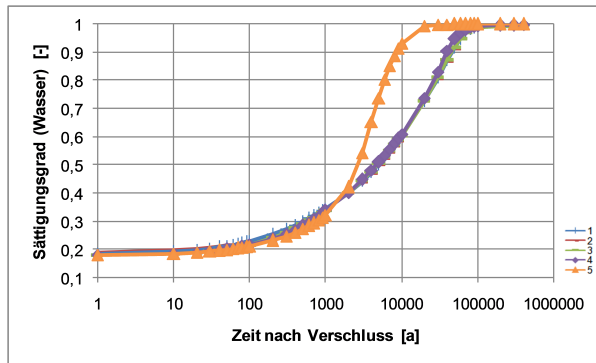


Abbildung 5.35: Zeitliche Entwicklung des Wassersättigungsgrades in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes im Tonsteingebirge.

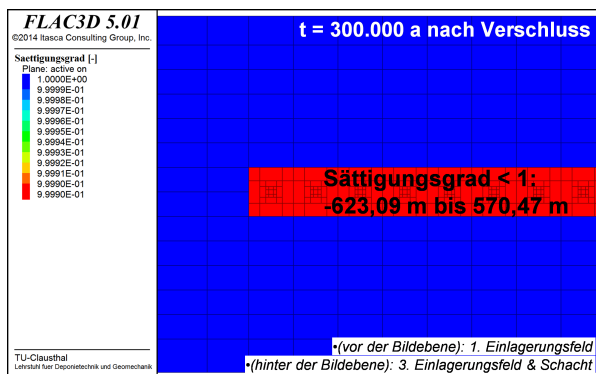


Abbildung 5.36: Flüssigkeitssättigung in den Einlagerungsstrecken sowie im Tonsteingebirge oberhalb des 2. Einlagerungsfeldes zum Zeitpunkt $t=300.000$ a nach Verschluss des Endlagers.

Sensitivitätsanalysen / Ausgewählte Simulationsergebnisse: Annahme eines vertikal (von unten nach oben) gerichteten primären hydraulischen Gradienten von $i = 0,15$ für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

Die hier betrachtete Situation ist angelehnt an die geohydraulischen Verhältnisse in der Schweiz, die in Project Opalinus Clay (2002) dokumentiert sind, allerdings hier mit einem höheren primären hydraulischen Gradienten, um dessen Einfluss auf die im Endlagerbergwerk sowie im umgebenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich ablaufenden fluiddynamischen Prozesse zu intensivieren.

Im Rahmen dieser Simulationsvariante hat sich gezeigt, dass der primäre hydraulische Gradient in den ersten Jahrtausenden nach Verschluss des Endlagers nur einen geringen Einfluss auf die ablaufenden fluiddynamischen Prozesse hat, da die sekundären hydraulischen Gradienten infolge der Auffahrungen der untertägigen Hohlräume das Systemverhalten des Endlagers dominieren. Sobald die versetzten Endlagerstrecken vollgesättigt sind und der darin anstehende Porenfluiddruck sich dem primären Porenfluiddruck annähert, gewinnt der primäre hydraulische Gradient an Bedeutung für das Endlagersystemverhalten. Dies gilt allerdings nur im Hinblick auf die auftretenden Wassermigrationsraten, während die Gasmigrationsraten nahezu unbeeinflusst bleiben und sich daher kaum von denen der Basis-Simulation unterscheiden.

Abbildung 5.37 zeigt für diese Simulationsvariante in einer vektoriellen Darstellung die Migrationsrate und die Migrationsrichtung des Porenwassers innerhalb des Tonsteingebirges zum Zeitpunkt $t=10.000$ a nach Verschluss des Endlagers, wobei deutlich eine bevorzugte Migrationsrichtung von unten nach oben entsprechend dem vorgegebenen primären hydraulischen Gradienten zu ersehen ist. Durch diese aufwärts gerichtete Porenwassermigration können im Endlager mobilisierte Radionuklide auch durch advektiven Transport in der Flüssigphase das Deckgebirge erreichen.

Sensitivitätsanalysen / Ausgewählte Simulationsergebnisse: Annahme einer geogen entstandenen, aber durch die Vorerkundung nicht entdeckten Störungszone mit mäßig erhöhter Permeabilität für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge

Diese Simulationsvariante repräsentiert ein Szenario, bei dem eine bei Auffahrung und Betrieb des Endlagers nicht entdeckte Störungszone existiert. Diese Störungszone wird stilisiert als vertikal anstehend mit einer gegenüber dem umgebenden Tonsteingebirge 100-fach erhöhten primären Permeabilität angenommen. Sie verläuft mittig durch das 2. Einlage-rungsfeld und ist im Rahmen der Vorerkundung sowie bei der Auffahrung

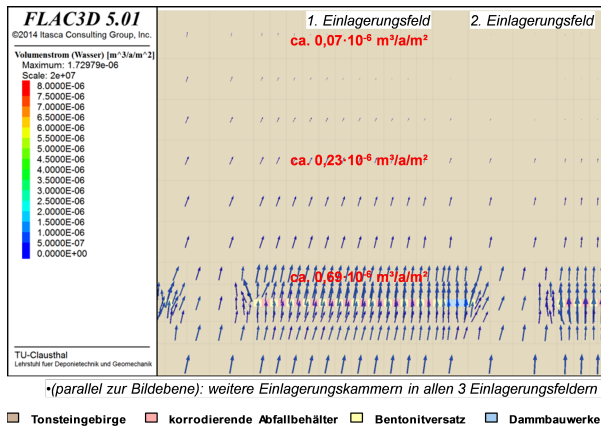


Abbildung 5.37: Porenwassermigration in der Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t=10.000 \text{ a}$ nach Verschluss des Endlagers.

des Streckensystems trotz Durchörterung nicht entdeckt worden, da sich ihre strukturellen Eigenschaften von denen der umgebenden Tonsteingebirge nur in geringem Maße unterscheiden und die hydraulische Wirksamkeit erst später aktiviert wird (latente Schwächezone).

Eine vergleichende Betrachtung der Berechnungsergebnisse dieser Simulationsvariante mit der Basis-Simulation für die Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge ergibt, dass sich die fluiddynamischen Prozesse und die daraus resultierenden physikalischen Größen im Endlagerbergwerk schon in einem Abstand von nur wenigen Metern zur Störungszone kaum noch unterscheiden. Allerdings ergeben sich für diese Simulationsvariante in den Berechnungszonen der Störungszone aufgrund der dort vorliegenden höheren Permeabilität signifikant höhere Gasmigrationsraten als in den entsprechenden Tonstein-Berechnungszonen der Basis-Simulation, entsprechend den in Abbildung 5.38 für Zeitpunkt $t=10.000 \text{ a}$ nach Verschluss des Endlagers dargestellten Simulationsergebnissen etwa um den Faktor 25. Demzufolge steigt das Porengas in der Störungszone auch schneller in Richtung des Deckgebirges auf als im umgebenden Tonsteingebirge. Entsprechend Abbildung 5.39 hat das Porengas zum Zeitpunkt $t=20.000 \text{ a}$ nach Verschluss des Endlagers in der Störungszone schon nahezu die halbe Distanz zwischen Einlagerungssohle und Deckgebirge zurückgelegt. Zum Zeitpunkt $t=60.000 \text{ a}$ nach Verschluss des Endlagers erreicht das in der Störungszone aufsteigende Porengas entsprechend Ab-

bildung 5.40 den oberen Modellrand und damit das Deckgebirge, während es im umgebenden Tonsteingebirge mit der nicht vergrößerten Permeabilität das Deckgebirge entsprechend Abbildung 5.41 ebenso wie in der Basis-Simulation für die Wirtsgesteinsinformation Tonsteingebirge bis zum Ende der korrosionsbedingten Gasbildung zum Zeitpunkt $t=300.000$ a nach Verschluss des Endlagers noch nicht erreicht. Hier zeigt sich sehr deutlich die sicherheitstechnisch grundsätzlich nachteilige Auswirkung von Heterogenitäten im Barrierengebirge.

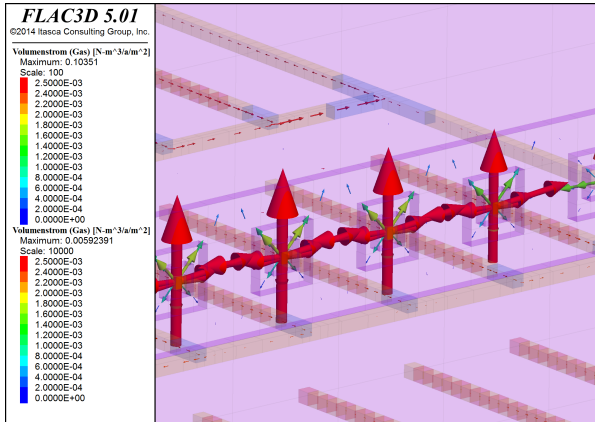


Abbildung 5.38: Poren-gasmigration innerhalb des Streckensystems sowie in der Störungszone zum Zeitpunkt $t=10.000$ a nach Verschluss des Endlagers im Tonsteingebirge.

Sensitivitätsanalysen / Ausgewählte Simulationsergebnisse: Annahme eines Laugennests 10 m unterhalb des mittleren Einlagerungsfeldes für ein Endlagersystem im Salinargebirge

Im Abschnitt ab Seite 521 ist bereits erläutert worden, dass die für die Behälterkorrosion zur Verfügung stehende Solemenge für den druckgetriebenen Gasinfiltrationsprozess von großer Bedeutung ist. Daher wurde der Einfluss eines bereits primär vorhandenen, aber während Auffahrung und Betrieb nicht erkannten Laugennests unterhalb des mittleren Einlagerungsfeldes im Hinblick auf den Zutrittsprozess (Wegsamkeitsausbildung und Fluidmigration), aber auch im Hinblick auf den Korrosionsprozess und somit auch auf den Gasinfiltrationsprozess untersucht. Abbildung 5.42 zeigt das verwendete Berechnungsmodell ohne das Salinargebirge. Es wird angenommen, dass das Laugennest 10 m unter der Einlagerungssohle liegt, wobei allerdings keine primär vorhandene Verbin-

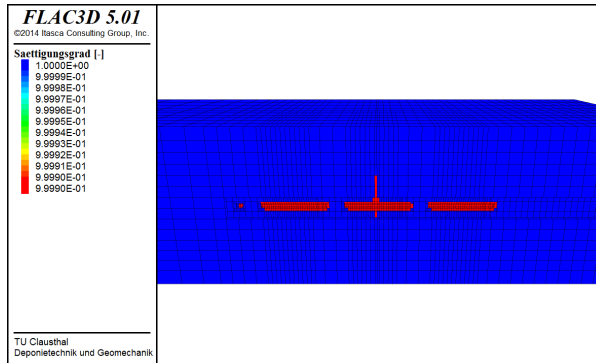


Abbildung 5.39: Flüssigkeitssättigung in den Einlagerungsstrecken sowie im umgebenden Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t=20.000$ a nach Verschluss des Endlagers (Schnitt senkrecht zur Störungsebene).

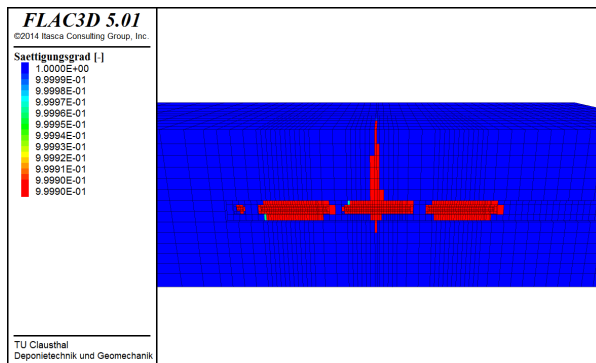


Abbildung 5.40: Flüssigkeitssättigung in den Einlagerungsstrecken sowie im umgebenden Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t=60.000$ a nach Verschluss des Endlagers (Schnitt senkrecht zur Störungsebene).

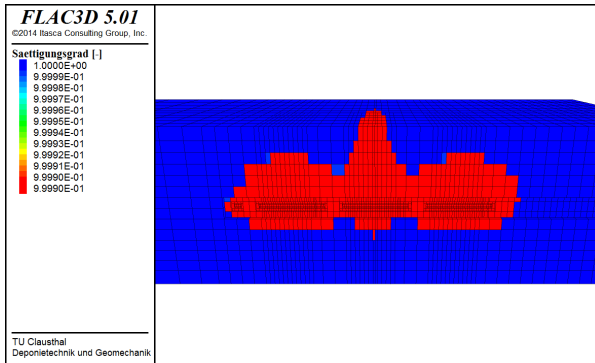


Abbildung 5.41: Flüssigkeitssättigung in den Einlagerungsstrecken sowie im umgebenden Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t=300.000$ a nach Verschluss des Endlagers (Schnitt senkrecht zur Störungsebene).

dung zwischen Laugennest und Einlagerungssohle existiert. Zudem wird angenommen, dass das Laugennest eine relativ geringe Porosität von etwa 3 % aufweist und etwa 1.000 m^3 Salzlösung mit einem Porendruck auf dem Niveau des lithostatischen Drucks enthält.

Abbildung 5.43 zeigt die numerischen Simulationsergebnisse zur zeitabhängigen Entwicklung von Porendruck und Temperatur für einen Beobachtungspunkt in der Mitte des Laugennests vom Beginn der Betriebsphase bis etwa 120 Jahre später. Etwa 10 Jahre nach Beginn der Betriebsphase werden die Abfallbehälter in die Einlagerungsstrecke direkt oberhalb des Beobachtungspunkts eingebracht. Es ist ersichtlich, dass aufgrund der Wärmeentwicklung der Abfallbehälter die Sole innerhalb des Laugennests ebenfalls erwärmt wird, was zu einer Erhöhung des Porendrucks im Laugennest führt, so dass der Porendruck nur wenige Monate nach der Abfalleinlagerung den lithostatischen Druck übersteigt. Dadurch wird ein druckgetriebener Soleinfiltrationsprozess induziert, der die Sole langsam in Richtung der Einlagerungssohle nach oben migrieren lässt.

Durch die Soleinfiltration in das Salinargebirge sinkt der Soledruck im Laugennest direkt wieder unter den lithostatischen Druck, steigt aber anschließend durch die weitere Erwärmung wieder an. Dieser zyklische Prozess setzt sich fort, bis die Wärmeleistung der Abfallbehälter etwa 80 Jahre nach Beginn der Betriebsphase nicht mehr hoch genug ist, um noch eine weitere Erwärmung des Laugennestes zu induzieren. Die Schwankungsbreite der zyklischen Soledruckerhöhung / -reduzierung weist eine

erhebliche Abhängigkeit von der numerischen Zeitschrittsteuerung auf, aber dennoch geben die numerischen Simulationsergebnisse einen sehr guten Einblick in die Prozesse, die in einer Sicherheitsanalyse berücksichtigt werden müssen.

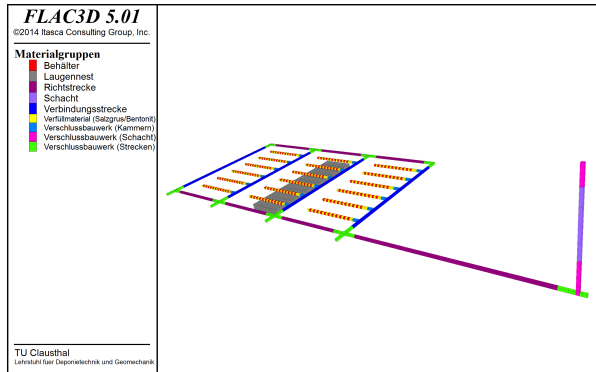


Abbildung 5.42: Globalmodell für ein generisches Endlagersystem im Salinargebirge mit zusätzlichem Laugennest.

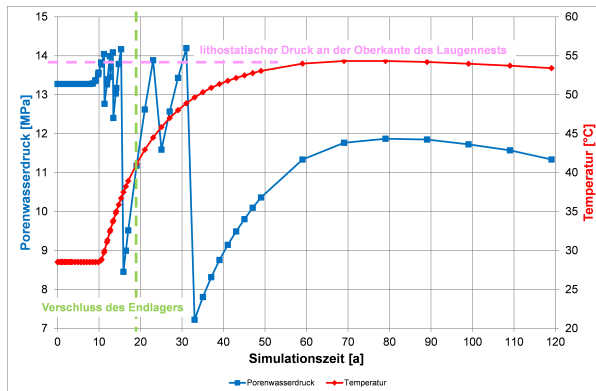


Abbildung 5.43: Zeitliche Entwicklung des Porenwasserdrucks und der Temperatur im Laugennest.

Abbildung 5.44 zeigt die Sekundärpermeabilitätsverteilung in dem von der druckgetriebenen Soleinfiltration betroffenen Gebirgsbereich, präziser die im Maximum etwa 12 Jahre nach Verschluss des Endlagers erreichte Sekundärpermeabilität. Aus Abbildung 5.44 ist zu ersehen, dass der In-

filtrationsbereich die Einlagerungsstrecken nicht erreicht und somit die Sole aus dem Laugennest nicht in die Einlagerungsstrecken migrieren kann (In der Abbildung werden keine Sekundärpermeabilitäten für das Laugennest, die sechs Einlagerungsstrecken und die zwei Richtstrecken angegeben, daher sind diese Bereiche in hellgrau dargestellt) . Vielmehr werden nur die Zonen direkt über dem Laugennest infiltriert, aber der Soledruckaufbau erhöht sich im infiltrierten Bereich nicht ausreichend, um für ein weiteres Voranschreiten der Infiltrationsfront zu sorgen. Dieses Ergebnis wird durch Abbildung 5.45 bestätigt, in dem die Flüssigkeits-sättigung etwa zwei Dekaden nach dem Verschluss des Endlagers gezeigt wird (In der Abbildung werden keine Flüssigkeitssättigungen für das Laugennest, die sechs Einlagerungsstrecken und die zwei Richtstrecken angegeben, daher sind diese Bereiche in hellgrau dargestellt). Zu diesem Zeitpunkt ist die druckgetriebene Soleinfiltration aus dem Laugennest in das Salinargebirge bereits beendet, weil – wie aus Abbildung 5.43 hervorgeht – der Soledruck im Laugennest zu diesem Zeitpunkt aufgrund der abnehmenden Wärmeleistung der Abfallbehälter bereits deutlich unter den lithostatischen Druck abgesunken ist.

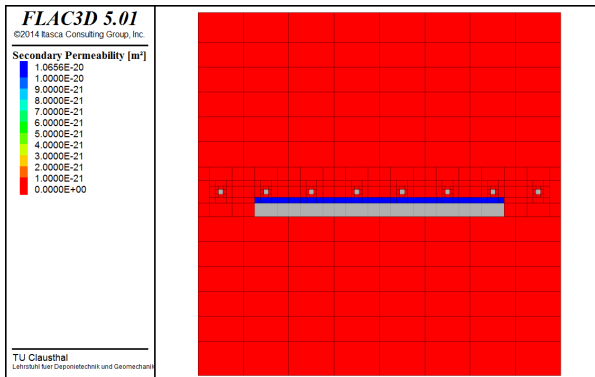


Abbildung 5.44: Sekundärpermeabilität im infiltrierten Bereich (Maximalwerte) etwa 12 Jahre nach Verschluss des Endlagers.

Es ist darauf hinzuweisen, dass nicht alle Zonen mit gegenüber dem initialen Sättigungsgrad $S_{l,0} = 0,5$ erhöhter Flüssigkeitssättigung von dem druckgetriebenen Infiltrationsprozess betroffen sind, sondern in einigen Zonen die erhöhte Flüssigkeitssättigung auf die thermische Ausdehnung der anfänglich vorhandenen Sole innerhalb dieser Zonen zurückzuführen ist. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in diesem Fall und bei dieser Art von numerischer Simulation das Laugennest keinen Kontakt

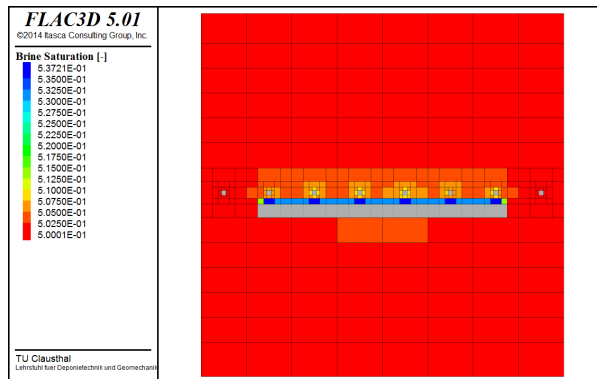


Abbildung 5.45: Flüssigkeitssättigung im Salinargebirge etwa 20 Jahre nach Verschluss des Endlagers.

zu den Einlagerungsstrecken erhält und daher die Sole aus dem Laugenest in diesem Beispiel nicht am Behälterkorrosionsprozess teilnehmen kann. Aufgrund einiger Vereinfachungen in dieser Globalmodell-Simulation, insbesondere hinsichtlich der Entwicklung des sekundären Gebirgsspannungszustands, der nicht in den Simulationsprozess einbezogen worden ist, müssen die relevanten Prozesse allerdings noch anhand von Lokalmodell-Simulationen detaillierter analysiert werden.

Laborative Untersuchungen zum Einfluss des Gasdrucks auf das langfristige Endlagerverhalten (Versatzkompaktion und Gasdruckaufbau, druckgetriebene Gasinfiltration, Zweiphasenflussprozesse im Tonsteingebirge)

Zum besseren Prozessverständnis und zur Stärkung der Robustheit einiger Sicherheitsfunktionen sind neben den rechnerischen Simulationen auch ausgewählte laborative Untersuchungen durchgeführt bzw. geplant worden. Zentrale Ergebnisse dieser Arbeiten sind:

Versatzkompaktion und Gasdruckaufbau. Im Porenraum von Versatzmaterialien wie Salzgrus oder Bentonit enthaltene Porenfluide, insbesondere die primär vorhandene Porenluft, werden durch die Versatzkompaktion und die damit einhergehende Reduzierung des Porenraumvolumens komprimiert, wodurch es zu einem allmählichen Gasdruckaufbau kommen kann, sofern die Porenfluide nicht anderweitig aus dem System ent-

weichen können. Der sich erhöhende Gasdruck wirkt seinerseits als Stützdruck gegen die weitere Versatzkompaktion.

In Lampe u. a. (2017) sind laborative Untersuchungen zur Salzgruskompaktion unter Berücksichtigung des Porendrucks dokumentiert. Wie zu erwarten ist, ist beobachtet worden, dass die Kompaktionsrate bei ansteigendem Porendruck und gleichbleibendem Manteldruck reduziert wird. Dieser Effekt wird im vorstehend beschriebenen Funktionalmodell Konvergenz durch den Faktor $f_p(p_i(t))$ berücksichtigt.

Im Rahmen der im ENTRIA-Teilprojekt VP 5.1 geplanten laborativen Untersuchungen sollte nicht der Gasdruckeinfluss auf die Kompaktionsrate, sondern der Kompaktionseinfluss auf den Gasdruckanstieg gemessen werden. Zur Durchführung dieser Versuche ist eine vorhandene Triaxialversuchsanlage umgerüstet worden. Bisher sind nach der Umrüstung der Versuchsanlage 3 Kompaktionsversuche an Salzgrusversatzmaterial durchgeführt worden, die allerdings nicht den entsprechend der thermischen Zustandsgleichung für ideale Gase bei der Salzgruskompaktion erwarteten Porendruckanstieg zeigen, sondern einen signifikant geringeren Gasdruckanstieg, teilweise sogar einen Gasdruckabfall, der bisher nur durch Undichtigkeiten im System zu erklären ist. An dieser Thematik wird weiter gearbeitet.

Druckgetriebene Gasinfiltration in ein primär impermeables Steinsalzgebirge. Steigt in einem verschlossenen Endlager im Salinargebirge der Porengasdruck im Versatzmaterial über das Niveau der Minimalspannung im Bereich der Streckenkontur, so ist davon auszugehen, dass ein druckgetriebener Gasinfiltrationsprozess in das primär impermeable Steinsalzgebirge induziert wird. Im Rahmen des ENTRIA-Teilprojekts VP 5.1 sollte dieser druckgetriebene Gasinfiltrationsprozess laborativ untersucht werden.

Bereits in dem in Wolters u. a. (2009) dokumentierten Forschungsprojekt „Weiterentwicklung der EDV-Software INFIL zur Simulation des druckgetriebenen Infiltrationsprozesses von Fluiden in ein nicht permeables Barrieren-Gebirge (Salinar)“ ist der druckgetriebene Infiltrationsprozess sehr intensiv untersucht worden, allerdings nicht für gasförmige Fluide. Da in einem verschlossenen Endlager im Salinargebirge die Gasdruckentwicklung und die Gasmigration von großer Bedeutung sind, ist eine bereits vorhandene Versuchsanlage modifiziert worden mit dem Ziel, auch den Gasinfiltrationsprozess untersuchen zu können.

Zur laborativen Untersuchung des druckgetriebenen Gasinfiltrationsprozesses sind Steinsalzprüfkörper entsprechend Abbildung 5.46 mit einer zentralen Bohrung versehen worden, in der ein Gasdruck aufgebracht

werden kann. Die derart präparierten Prüfkörper sind dann in die Versuchsanlage eingebaut worden, wo sie mit einem Axialdruck von $\sigma_{axial} = 4$ MPa und einem Manteldruck von $\sigma_{radial} = 3$ MPa beaufschlagt worden sind. Anschließend ist der Gasdruck in der Bohrung beginnend mit $p_g = 3$ MPa in mehreren Stufen jeweils nach etwa einer Woche um $\Delta p_g = 0,1$ MPa erhöht worden. In der jeweils einwöchigen Beobachtungsphase ist der Gasdruck in der Bohrung möglichst konstant gehalten worden. Die nach Beginn der Infiltration dazu aufgrund des infiltrationsbedingten Gasverlustes kontinuierlich in die Bohrung hinein nachzuführende Gasmenge ist gemessen worden.

Die infiltrationsbedingt auf der Sekundärseite des Prüfkörpers austretende Gasmenge ist zunächst in einem kleinen Behälter aufgefangen worden. In diesem Behälter wurde zu Versuchsbeginn ein Gasdruck entsprechend des Atmosphärendrucks angelegt. Aufgrund der sekundärseitig austretenden Gasmenge hat sich der Gasdruck in dem Behälter erhöht, bis ein Gasdruck von etwa 1,8 bar erreicht worden ist. Anschließend ist der Gasdruck in dem Behälter durch die Öffnung eines Magnetventils wieder abgebaut worden.

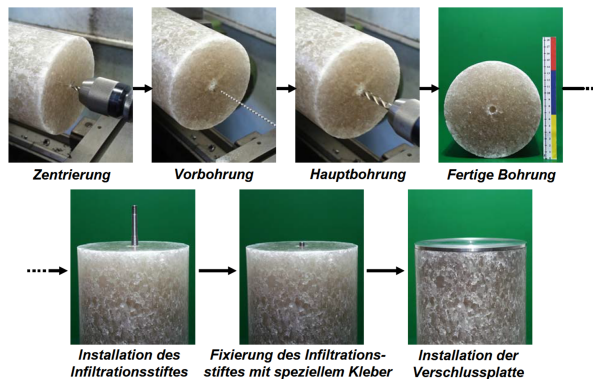


Abbildung 5.46: Prüfkörpervorbereitung für einen Infiltrationsversuch.

Abbildung 5.47 zeigt für einen exemplarischen Versuch die primär- und sekundärseitige Gasdruckentwicklung. Es ist zu ersehen, dass erst bei einem in der Bohrung anliegenden Gasdruck von $p_g = 3,7$ MPa ein Ausstritt von Gas an der Sekundärseite des Prüfkörpers detektiert worden ist. Abbildung 5.48 zeigt die während des Versuchs gemessene primärseitig infiltrierende sowie sekundärseitig austretende Gasmenge. Es ist darauf hinzuweisen, dass die in Abbildung 5.48 dargestellten Gasvolumina nicht

bezogen sind auf Normbedingungen, sondern auf den jeweils primärseitig bzw. sekundärseitig anliegenden Gasdruck. Aus Abbildung 5.48 ist zu ersehen, dass bei Erreichen des Gasdrucks von $p_g = 3,7$ MPa die über die Bohrung in den Prüfkörper infiltrierte Gasmenge sehr stark zunimmt. Bei Erhöhung des Gasdrucks auf $p_g = 3,8$ MPa wird die Infiltration sogar nochmals verstärkt. Grund dafür ist, dass in dieser Phase bereits eine hydraulisch wirksame Verbindung zwischen der Bohrung und der Sekundärseite des Prüfkörpers vorliegt und der pneumatische Gradient angehoben wird. Allerdings ist aus Abbildung 5.48 auch zu ersehen, dass schon ab der Gasdruckstufe $p_g = 3,1$ MPa geringe Mengen an Gas in die Bohrung nachgeschoben werden müssen, um den Gasdruck in den einzelnen Stufen konstant zu halten, d. h. der druckgetriebene Gasinfiltrationsprozess beginnt wie erwartet schon, sobald der Gasdruck die anliegende Minimalspannung überschreitet.

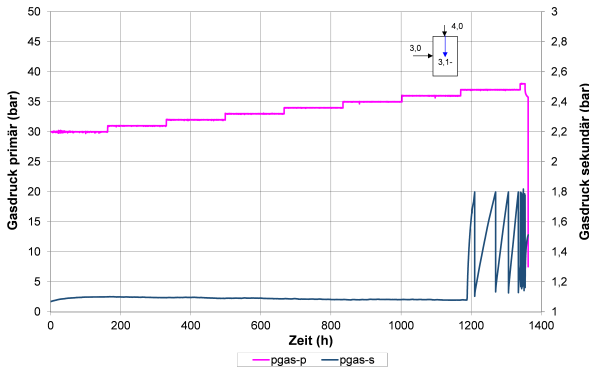


Abbildung 5.47: Primär- und sekundärseitige Gasdruckentwicklung.

Eine numerische Simulation dieses Laborversuchs hat ergeben, dass die Zeit bis zum Gasdurchschlag an der Sekundärseite des Prüfkörpers erheblich länger ist, als sie unter Berücksichtigung der jeweiligen Fluidviskositäten anhand der in Wolters u. a. (2009) mit flüssigen Infiltrationsfluiden durchgeführten Versuche zu erwarten gewesen wäre. Als Ursache dafür wird der Einfluss von Kapillareffekten auf die druckgetriebene Flüssigkeitsinfiltration gesehen. Sollte sich diese Interpretation in weiteren Versuchen bestätigen, wäre die in den Globalmodell-Simulationen für ein Endlager im Salinargebirge berechnete Propagationsgeschwindigkeit der Gasinfiltrationsfront überschätzt worden.

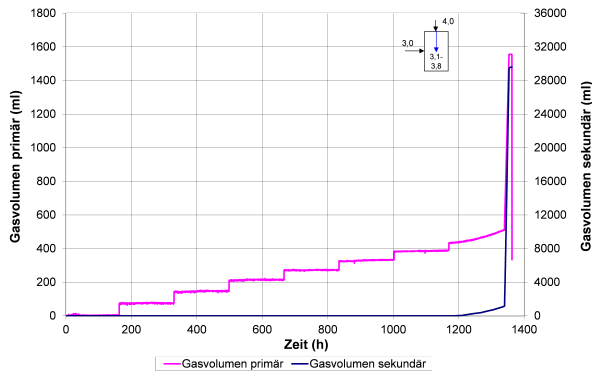


Abbildung 5.48: Primär- und sekundärseitige Gasvolumenentwicklung.

Zweiphasenflussprozesse im Tonsteingebirge. Im Rahmen des ENTRIA-Teilprojektes VP 5.2 war vorgesehen, Zweiphasenflussprozesse in Tongestein neben einer numerischen Simulation auch laborativ zu untersuchen. Vor diesem Hintergrund sind einerseits eine Triaxialanlage zur Untersuchung der funktionalen Beziehung zwischen Sättigungsgrad und fluidbezogenen Relativpermeabilitäten von Tonstein und andererseits eine Versuchsanlage zur Untersuchung der funktionalen Beziehung zwischen Sättigungsgrad und Kapillardruck von Tonstein basierend auf der in Torsæter u. Abtahi (2003) beschriebenen Porous-Plate-Methode entwickelt und konstruiert worden.

Abbildung 5.49 zeigt eine schematische Skizze der Versuchsanlage zur Untersuchung der Relativpermeabilitätseigenschaften, Abbildung 5.50 ergänzend zur Illustration einige Fotos der Versuchsanlage. Die Versuchsanlage enthält zur präzisen Steuerung der Fluiddrücke sowie des Manteldrucks insgesamt 4 EMC-Anlagen, die unabhängig voneinander geregelt werden können. Diese sind auf dem linken Foto von Abbildung 5.50 dargestellt. Das mittlere und das rechte Foto zeigen die Triaxialzelle selbst. Derzeit befindet sich die Anlage noch in der Test- bzw. Kalibrierungsphase.

Abbildung 5.51 zeigt in einer Draufsicht (oben) und einer Seitenansicht (unten) die Versuchsanlage zur Untersuchung der Kapillardruckeigenschaften. Aufgrund der zu erwartenden geringen Fluidbewegungen können in die Anlage 4 Prüfkörper gleichzeitig eingebaut werden, um so die Fluidbewegungen zu intensivieren und damit besser messbar zu machen. Auch diese Anlage befindet sich noch in der Test- bzw. Kalibrierungsphase.

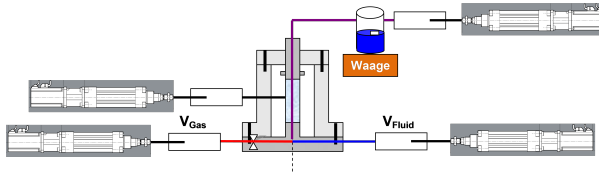


Abbildung 5.49: Schematische Darstellung der Versuchsanlage zur Charakterisierung der funktionalen Beziehung zwischen Sättigungsgrad und fluidbezogenen Relativpermeabilitäten im Tonstein.



Abbildung 5.50: Versuchsanlage zur Charakterisierung der funktionalen Beziehung zwischen Sättigungsgrad und fluidbezogenen Relativpermeabilitäten im Tonstein.

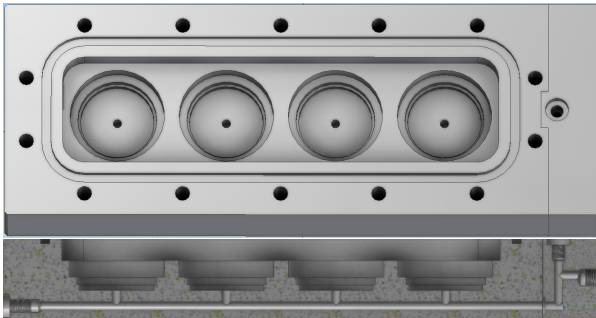


Abbildung 5.51: Draufsicht (oben) bzw. Seitenansicht (unten) der Versuchsanlage zur Charakterisierung der funktionalen Beziehung zwischen Sättigungsgrad und Kapillardruck im Tonstein.

Zu beiden Versuchsanlagen sind im Hinblick auf die konstruktive Planung im Rahmen des ENTRIA-Teilprojekts VP 5.2 numerische Vorausberechnungen durchgeführt worden, die in Zhao (2017) dokumentiert worden sind.

Weiterentwicklung des Stoffmodells Lux / Wolters

Im Rahmen der Bearbeitung des ENTRIA-Teilprojekts VP 5.1 wird zur physikalischen Modellierung und numerischen Simulation des thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Materialverhaltens von Steinsalz das in Wolters (2014) dokumentierte Stoffmodell Lux / Wolters verwendet. Das Stoffmodell Lux / Wolters ist modular aufgebaut mit einem (thermo)mechanischem Modul und einem Kopplungsmodul zu hydraulischen und thermischen Modulen. Die unmittelbar die mechanischen Eigenschaften beeinflussenden thermischen und hydraulischen Einwirkungen sind in dem mechanischen Modul integriert. Abbildung 5.52 gibt einen schematischen Überblick über das Stoffmodell Lux / Wolters mit Stand 2014, fokussiert auf die Modellierung mechanischer Prozesse.

Parallel zu den durchgeführten numerischen Simulationen ist im ENTRIA-Teilprojekt VP 5.1 das Stoffmodell Lux / Wolters basierend auf neuen laborativen Erkenntnissen weiterentwickelt worden, insbesondere hinsichtlich der physikalischen Modellierung von Schädigungsprozessen im Steinsalz. Eine detaillierte Beschreibung dieser Weiterentwicklung ist (Lux u. a., 2018) zu entnehmen. Abbildung 5.53 zeigt in stark abstrahierter Form den strukturellen Aufbau des weiterentwickelten Stoffmodells Lux / Wolters.

Auch im weiterentwickelten Stoffmodell Lux/Wolters ergibt sich die Gesamtverzerrungsrate $\dot{\epsilon}_{ij}$, die sich bei einem vorgegebenen Belastungszustand einstellt, entsprechend der Boltzmannschen Hypothese von der Additivität der Verzerrungsratenanteile durch eine additive Überlagerung der einzelnen Verzerrungsratenanteile:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^v + \dot{\epsilon}_{ij}^d + \dot{\epsilon}_{ij}^h$$

mit

- $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ elastische Verzerrungsrate in d^{-1} ,
- $\dot{\epsilon}_{ij}^v$ viskose Verzerrungsrate in d^{-1} ,
- $\dot{\epsilon}_{ij}^d$ schädigungsinduzierte Verzerrungsrate in d^{-1} und
- $\dot{\epsilon}_{ij}^h$ verheilungsinduzierte Verzerrungsrate in d^{-1} .

Die Modellierung der elastischen, der viskosen sowie der verheilungsinduzierten Verzerrungsrate erfolgen auch im weiterentwickelten Stoffmodell Lux / Wolters noch entsprechend der in Wolters (2014) dokumentier-

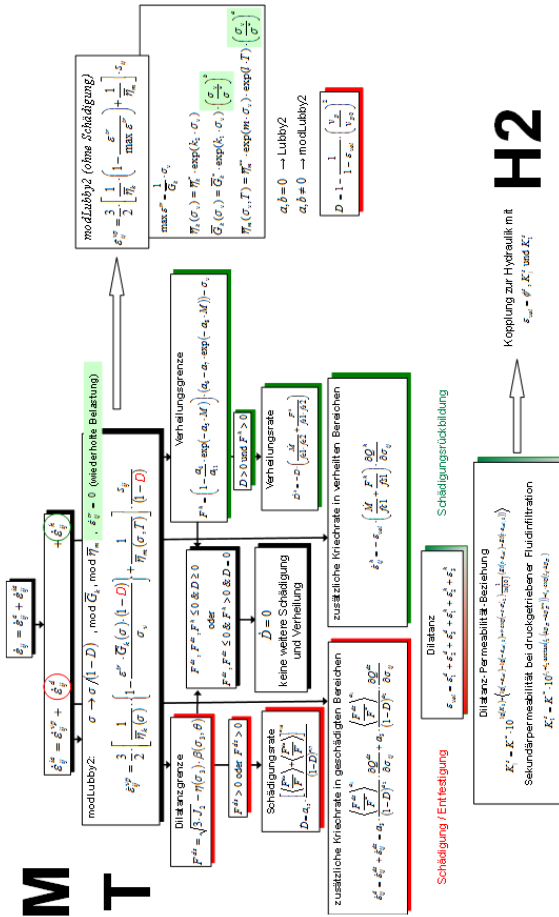


Abbildung 5.52: Überblick über das Stoffmodell Lux / Wolters.

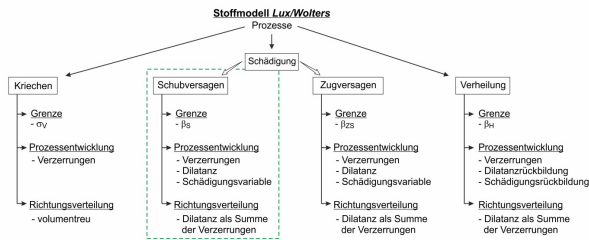


Abbildung 5.53: Struktureller Aufbau des weiterentwickelten Stoffmodells Lux / Wolters (Lux u. a., 2018).

ten Gleichungen. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nunmehr nur die Modellierung der schädigungsinduzierten Verzerrungsrate erläutert.

Die Weiterentwicklung des Ansatzes zur Schädigungsmodellierung begründet sich dadurch, dass im Stoffmodell Lux / Wolters mit Stand 2014 die Ermittlung der schädigungsbezogenen Materialparameter auf triaxialen Kriechversuchen basiert, die zur Identifizierung der einzelnen Verzerrungsanteile (schädigungsfrei, schädigungsbehaftet) als Mehrstufenversuche über Zeiten von 180 Tagen und mehr durchzuführen sind. Diese langen Versuchszeiten resultieren insbesondere dann, wenn die aus einem Datenkollektiv von triaxialen Kurzzeitversuchen prüfkörperindividuell einzuschätzende Gefügeschädigungsgrenze (die tatsächlich prüfkörperindividuell vorliegende Gefügefestigkeit) nicht hinreichend genau erfasst wird.

Um den versuchstechnischen Aufwand zu reduzieren und die Materialparameterermittlung auf eine zuverlässigere Basis zu stellen, ist eine grundsätzlich neue Untersuchungsmethodik entsprechend Abbildung 5.54 konzipiert worden. Zentrale Elemente sind:

1. Ableitung nicht nur der Bruchfestigkeit und der Gefügefestigkeit, sondern auch Ableitung der Kriech- und Schädigungsparameter aus Kurzzeitversuchen, wobei die Kurzzeitversuche unterhalb und oberhalb der Gefügefestigkeit und hier bis in den Nachbruchbereich sowie bei variierter Deformationsrate durchgeführt werden.
2. Überprüfung der Prognosezuverlässigkeit des Stoffmodells anhand von Langzeitkriechversuchen.

Dieser methodisch neue Ansatz hat grundsätzlich den Vorteil, dass die triaxialen Kurzzeitversuche mit variierter Deformationsrate versuchstechnisch zuverlässig durchgeführt werden können und die aufwendigen

triaxialen Langzeitversuche lediglich zur Bestätigung der abgeleiteten Materialparameter herangezogen werden und damit in deutlich geringerem Umfang zur Verfügung stehen müssen als dieses bislang der Fall ist.

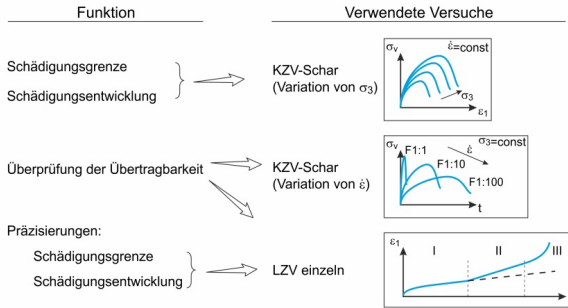


Abbildung 5.54: Modifizierte laborative Versuchsbasis für den weiterentwickelten Schädigungsansatz des Stoffmodells Lux / Wolters (Lux u. a., 2018).

Es erscheint zunächst wenig plausibel, die versuchstechnische Basis für die Entwicklung eines Schädigungsstoffmodells von triaxialen Langzeit-Kriechversuchen auf verzerrungsgeregelte triaxiale Kurzzeitversuche zu verlagern – zumal die Modellierung der in Verbindung mit Kriechprozessen bei Beanspruchungen oberhalb der Schädigungsgrenze auftretenden Gefügeschädigungen im Fokus steht. Durch die strategische Verlagerung der Untersuchung der Schädigungsentwicklung auf triaxiale Kurzzeitversuche werden allerdings folgende Vorteile erwartet:

- Erhöhung der laborativ generierten Informationsdichte (Versuchsdauer bei Kurzzeitversuchen um den Faktor 20 geringer im Vergleich zu Langzeitversuchen);
- versuchstechnisch belegte Einbeziehung eines erweiterten Beanspruchungsbereichs in die Beschreibung der Abhängigkeit des Schädigungsprozesses vom Beanspruchungsniveau entsprechend Abbildung 5.55 (a);
- erweiterte Datenbasis bei der Beschreibung der Abhängigkeit des Schädigungsprozesses von der Deformationsrate und damit verringerte Extrapolationsweite auf den in-situ relevanten Bereich entsprechend Abbildung 5.55 (b);

- garantierte Durchföhrung und damit auch messtechnisch gesicherte Beobachtung der Deformationsphase mit einem intensiven akzelerierenden Schädigungsprozess bis hin zur Restfestigkeit.

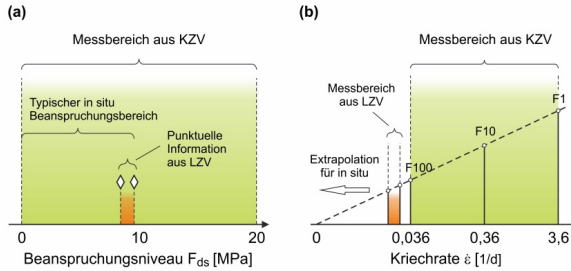


Abbildung 5.55: Vergleich der Untersuchungsbereiche in Kurzzeitversuchen und in Langzeitversuchen in Bezug auf (a) Beanspruchungsniveau und (b) Deformationsrate (Lux u. a., 2018).

Im Zentrum des neuen Schädigungsansatzes stehen die Formulierungen zur zeitlichen, durch die jeweiligen Einflussgrößen gesteuerten Entwicklung der drei relevanten Schädigungsgrößen, d. h. der schädigungsinduzierten Verzerrungskomponenten in Form der Verzerrungsratenkomponenten $\dot{\epsilon}_{ij}^d$, der Dilatanzrate als der Summe dieser Verzerrungsratenkomponenten $\dot{\epsilon}_{vol}$ und der Schädigungsrate \dot{d} :

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_{ij}^d &= a3 \cdot f(n_V) \cdot f_1(\epsilon_{vol}) \cdot \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \\ \dot{\epsilon}_{vol} &= \sum_{i,j} \dot{\epsilon}_{ij}^d \\ \dot{d} &= a15 \cdot f(n_V) \cdot f(\eta_{dil}) \cdot f_1(\epsilon_{vol})\end{aligned}$$

mit

$\dot{\varepsilon}_{ij}^d$	schädigungsinduzierte Verzerrungsrate in d^{-1} ,
$\dot{\varepsilon}_{vol}$	schädigungsinduzierte Dilatanzrate in d^{-1} ,
\dot{d}	Schädigungsrate in d^{-1} ,
η_V	aktuelle gesamte Viskosität des Materials in MPa · d,
η_{dil}	Ausnutzungsgrad bezogen auf die Schädigungsgrenze $\eta_{dil} = \sigma_v / \beta_{dil}$ (dimensionslos),
Q	Potentialfunktion in MPa,
σ_{ij}	Tensor der Spannungen in MPa und
$a3, a15$	Materialparameter (dimensionslos).

Die durch die Analyse der Versuchsdaten ermittelten funktionalen Abhängigkeiten dieser schädigungsrelevanten Zustandsgrößen von den Haupteinflussgrößen η_V , η_{dil} und ε_{vol} haben folgende Form:

$$f(\eta_V) = \frac{\sigma_v}{\eta_V}$$

$$f(\eta_{dil}) = f\left(\frac{F_{ds}}{\beta_{dil}}\right) = \exp\left(a1 \cdot \frac{F_{ds}}{\beta_{dil}}\right) \cdot \left(\frac{F_{ds}}{\beta_{dil}}\right)^{a1_2}$$

$$f_1(\varepsilon_{vol}) = \exp\left(a2 \cdot \frac{\varepsilon_{vol} - \varepsilon_{vol \text{ krit}}}{\varepsilon_{vol \text{ rest}}}\right) \quad \text{ab } \varepsilon_{vol} > \varepsilon_{vol \text{ krit}}$$

mit

F_{ds}	Fließfunktion in MPa,
β_{dil}	Dilatanzgrenze / Schädigungsgrenze in MPa,
$\varepsilon_{vol \text{ krit}}$	kritischer Dilatanzwert für den Beginn der Akzeleration des Schädigungsprozesses (dimensionslos),
$\varepsilon_{vol \text{ rest}}$	kritischer Dilatanzwert für das Erreichen der Restfestigkeit (dimensionslos) und
$a1, a1_2, a2$	Materialparameter (dimensionslos).

Die Richtungsverteilung für die schädigungsinduzierten Verzerrungskomponenten ist mit Hilfe einer neuen Potentialfunktion bestimmt worden, die trotz einer vereinfachten und mathematisch besser handhabbaren Formulierung weiterhin eine physikalisch plausible Richtungsverteilung der Verzerrungskomponenten für triaxiale Kompressionsbeanspruchungszustände (TC), triaxiale Extensionsbeanspruchungszustände (TE) und beliebige dreiaxiale Beanspruchungszustände gewährleistet. Die Ab-

leitungen dieser Potentialfunktion nach den Hauptspannungskomponenten ergeben sich zu:

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q}{\partial \sigma_1} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{s_1}{\sigma_v} \\ \frac{\partial Q}{\partial \sigma_2} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{s_2}{\sigma_v} + a0 \cdot c1 \cdot \frac{1}{2} \cos \left(\frac{3}{2} \cdot \theta + \frac{\pi}{4} \right) \\ \frac{\partial Q}{\partial \sigma_3} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{s_3}{\sigma_v} + a0 \cdot c1 \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cos \left(\frac{3}{2} \cdot \theta + \frac{\pi}{4} \right) \right)\end{aligned}$$

mit

- σ_{ii} Hauptkomponenten des Spannungstensors in MPa,
- s_{ii} Hauptkomponenten des deviatorischen Spannungstensors in MPa,
- σ_v Vergleichsspannung nach von Mises in MPa,
- θ Lode-Winkel für die Spannungsgeometrie ($-\pi/6 \leq \theta \leq \pi/6$)
- $a0$ Materialparameter (dimensionslos) und
- $c1$ Materialparameter (dimensionslos).

Die Grenzen für den Beginn des Schädigungsprozesses sowie für das Erreichen des Restfestigkeitszustands sind so organisiert, dass die anfangs definierte Dilatanzgrenze in linearer Abhängigkeit vom aktuellen Schädigungszustand final in die Restfestigkeitsgrenze übergeht:

$$\begin{aligned}F_{dz} &= \sigma_v - \beta_{dil} \\ \beta_{dil} &= (1 - a4(\varepsilon_{vol}) \cdot \exp(-a5(\varepsilon_{vol}) \cdot \sigma_3)) \cdot \beta_{br} \\ a4 &= a4_0 + (a4_{rest} - a4_0) \cdot f_2(\varepsilon_{vol}) \\ f_2(\varepsilon_{vol}) &= \frac{\varepsilon_{vol} - \varepsilon_{vol \text{ krit}}}{\varepsilon_{vol \text{ rest}} - \varepsilon_{vol \text{ krit}}} \quad \text{ab } \varepsilon_{vol} > \varepsilon_{vol \text{ krit}} \quad \text{bis } \varepsilon_{vol} > \varepsilon_{vol \text{ rest}}\end{aligned}$$

mit

- $a4_0$ Materialparameter für die Dilatanzfestigkeitsgrenze (dimensionslos),
- $a5_0$ Materialparameter für die Dilatanzfestigkeitsgrenze (dimensionslos),
- $a4_{rest}$ Materialparameter für die Restfestigkeitsgrenze (dimensionslos),
- a_{rest} Materialparameter für die Restfestigkeitsgrenze (dimensionslos) und
- β_{br} Bruchfestigkeitsgrenze in MPa.

Zusätzlich ist in dem neuen Stoffmodellteil der Einfluss der Schädigungsentwicklung auf die elastischen und viskosen Materialeigenschaften

ten formuliert. Die funktionalen Abhängigkeiten dafür sehen wie folgt aus:

$$\begin{aligned}\bar{\eta}_m &= \bar{\eta}_m(\text{modLubby2}) / f_3(\varepsilon_{\text{vol}}) \\ f_3(\varepsilon_{\text{vol}}) &= \exp\left(a_{K2} \cdot \frac{\varepsilon_{\text{vol}} - \varepsilon_{\text{vol rest}}}{\varepsilon_{\text{vol rest}}}\right) \\ E &= E_0 - (E_0 - E_{\text{rest}}) \cdot f_4(\varepsilon_{\text{vol}}) \\ f_4(\varepsilon_{\text{vol}}) &= f_2(\varepsilon_{\text{vol}})\end{aligned}$$

mit

$\bar{\eta}_m(\text{modLubby2})$	aktuelle Viskosität des Materials für schadungsfreies stationäres Kriechen (ermittelt mit dem Stoffmodell modLubby2) in MPa · d,
$\bar{\eta}_m$	aktuelle schadigungsbeeinflusste Viskosität des Materials für stationäres Kriechen in MPa · d,
E_0, E_{rest}	Elastizitätsmodul für den Anfangszustand (ungeschädigt) und den Restfestigkeitszustand (stark geschädigt) in MPa, und
a_{K2}	Materialparameter (dimensionslos).

Es ist abschließend anzumerken, dass

- die funktionalen Abhängigkeiten für die elastischen und viskosen Materialeigenschaften von dem aktuellen Schädigungszustand im Schädigungsmodell nicht direkt aus laborativen Daten abgeleitet worden sind, sondern aktuell nur auf Plausibilitätsvorstellungen basieren, dass
- die Schädigungsvariable hier aus den laborativen Messwerten zu der Ultraschallwellenlaufgeschwindigkeit nach $d = \left(1 - (\nu/\nu_0)^2\right)$ abgeleitet wird und dass
- der Temperatureinfluss auf die Schädigungsprozessentwicklung in den Formulierungen aktuell nicht direkt berücksichtigt wird, weil zunächst davon ausgegangen wird, dass dieser Einfluss indirekt durch die Kopplung zum Kriechteil des Stoffmodells eine ausreichende Berücksichtigung findet und eine weitere Präzisierung entsprechende laborative Untersuchungen erfordert.

Grundsätzlich werden mit dem neuen Stoffmodellansatz zur physikalischen Modellierung des Schädigungsprozesses der laborative Aufwand zur Parameterermittlung erheblich vermindert sowie die Robustheit der Prozesssimulation und damit auch die Prognosezuverlässigkeit signifikant verbessert.

5.5.2 Arbeitspaket 5.3 (IELF-ES): Migrationsverhalten von Radionukliden

Zielsetzung

Die radiologische Konsequenzenanalyse ist ein zentraler Bestandteil von Langzeitsicherheitsanalysen für Endlagersysteme. Voraussetzung für eine radiologische Konsequenzenanalyse ist die numerische Prognose der Fluidodynamik und der Radionuklidmigration im Endlagersystem. Die numerische Beschreibung der fluiddynamischen Prozesse im Endlagersystem wird zunehmend komplexer und realitätsnäher dank der Forschung zu thermisch, hydraulisch und mechanisch (THM) gekoppelten Prozessen (einschließlich Multiphasenfluss TH2M) und der Weiterentwicklung numerischer Werkzeuge. Allerdings wurden die Modellierungen der TH2M-gekoppelten Prozesse und der Radionuklidmigration häufig separat durchgeführt (Larue u. a., 2013), da unterschiedliche numerische Werkzeuge für die zwei Themen entwickelt wurden, z. B. FLAC-TOUGH (FTK-Simulator) (Rutqvist, 2011) für die TH2M Prozesse und TOUGH2-EOS9nT (Moridis u. a., 1999) für die Transportprozesse von Radionukliden (einschließlich Zerfallsketten).

Das Ziel des AP5.3 (Arbeiten des IELF-ES) war eine exemplarische numerische Analyse der Transportprozesse der relevanten Radionuklide im Endlagersystem unter direkter Nutzung der fluiddynamischen Daten aus den Modellierungsarbeiten des LfDG in den Arbeitspaketen 5.1, 5.2 und 6.7. Letztere haben die thermisch, hydraulisch und mechanisch gekoppelten Prozesse, inklusive Zweiphasenfluss (TH2M) zum Gegenstand und erfolgten mit dem Programm FLAC-TOUGH (FTK-Simulator). Ergebnisse sind u. a. die für die hier beschriebenen Rechnungen benötigten fluiddynamischen Eingangsdaten. Damit wurden methodische Grundlagen und Werkzeuge für den Vergleich der Entsorgungsoptionen erarbeitet.

Zur Demonstration wurde im Rahmen des AP5.3 im Arbeitsteil des IELF-ES eine numerische Analyse der Transportprozesse der relevanten Radionuklide im Endlagersystem im Tongestein mit sowie ohne Monitoringsohle durchgeführt. Weiterhin wurde ein Test zur Unsicherheitsanalyse mit dem Transportmodell unter Verwendung des vom IELF-ES im AP 4.1 entwickelten Software-Werkzeugs ReSUS (Li, 2015; Ghofrani, 2016) durchgeführt. Die Erkenntnisse zu Transportprozessen der Radionuklide im Nah- und Fernfeld unter Zweiphasenströmungsbedingung wurden genutzt, um das Prozessverständnis zum Barrierensystem des Endlagers in Hinblick auf die Wirksamkeit einzelner Barrieren sowie auf die Radionuklidfreisetzung zu erhöhen.

Methodik

TOUGH2-EOS9nT (Moridis u. a., 1999) ist ein Modul der TOUGH2-Familie für die Simulation der Transportprozesse von Radionukliden (einschließlich Zerfallsketten) in porösen Medien. Abbildung 5.56 zeigt, dass TOUGH2-

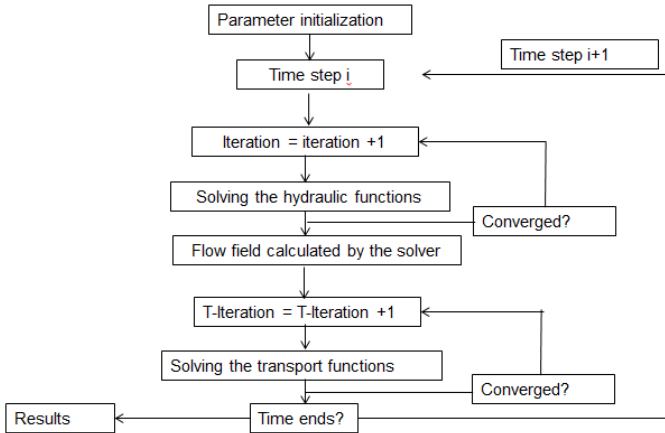


Abbildung 5.56: Vereinfachte Darstellung des Programmablaufs von TOUGH2-EOS9nT (Moridis u. a., 1999).

EOS9nT aus zwei Komponenten besteht. In einem numerischen Iterationslauf werden zuerst die hydraulischen Prozesse simuliert. Die errechneten fluiddynamischen Daten beschreiben die Flüssigkeitsströme zwischen den verbundenen Modellelementen. Diese Daten („Strömungsfeld“) werden zur zweiten Komponente in TOUGH2-EOS9nT weitergeleitet. Der zweite Teil des Simulators löst die Transportgleichungen, mit denen die Nuklidtransportprozesse berechnet werden. Die zwei Komponenten sind voneinander sauber getrennt, was eine Codemodifikation ermöglicht. Um die Zielsetzung von AP5.3 – die Modellierung von Radionuklidtransportprozessen unter Verwendung von mit dem FTK-Simulator berechneten fluiddynamischen Daten – zu erfüllen, wurde TOUGH2-EOS9nT so verändert, dass das „Strömungsfeld“ nicht von der hydraulischen Simulationskomponente an die Transportkomponente übergeben wird, sondern aus „externen Dateien“ eingelesen wird. Die ursprüngliche hydraulische Simulationskomponente wird dagegen stillgelegt. Die „externen Dateien“ enthalten die Fluidströmungsdaten aus dem FTK-Simulator. Dank der Modifikation können die Transportprozes-

se der Nuklidzerfallskette unter den TH2M-Zweiphasenfluss gekoppelten Bedingungen simuliert werden.

Modellannahmen

Das in AP5.3 verwendete Modell für TOUGH2-EOS9nT beruht auf identischen Materialgruppen und räumlicher Diskretisierung wie das Globalmodell in den Arbeitspaketen 5.1, 5.2 und 6.7, siehe Abb. 5.57 und 5.99. Somit wird erreicht, dass die Ergebnisse des FTK-Simulators kompatibel mit dem Modell für TOUGH2-EOS9nT sind. Drei Modellgruppen mit unter-

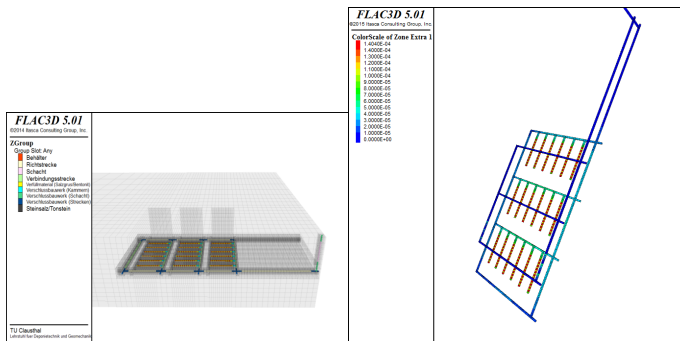


Abbildung 5.57: Das Globalmodell mit den Stoffkomponenten in einem Endlagersystem im Tongebirge (links) und das Grubengebäude für das Endlager mit Vorkehrung zur Rückholung mit Monitoringsohle 40m über dem Grubengebäude (rechts).

schiedlichen Rechenfällen werden bei der Analyse betrachtet. Für die Tonformationen in den nord- und süddeutschen Regionen wird eine Mächtigkeit des Wirtsgesteins von 400 m bzw. 100 m angenommen. Tabelle 5.6 listet die Rechenfälle auf, die in der Analyse berücksichtigt wurden.

Für das Endlagerkonzept mit Vorkehrung zur Rückholung werden Überwachungssohlen und Monitoring-Bohrungen im globalen Modell angenommen. Für dieses Konzept werden die in Tabelle 5.7 aufgelisteten Rechenfälle analysiert.

Bei den Modellen für die Endlagerkonzepte mit und ohne Vorkehrung zur Rückholung wird angenommen, dass die Freisetzung der Radionuklide aus allen Abfallbehältern gleichzeitig direkt nach dem Verschluss beginnt, vom Einschluss durch die Abfallbehälter und der Beständigkeit der Abfallmatrix wird im Modell also kein Kredit genommen.

Tabelle 5.6: Im Arbeitspaket 5.3 für das Modell ohne Vorkehrung zur Rückholung berücksichtigte Rechenfälle.

Rechenfall	Beschreibung
Basisfall	Behälterkorrosionsrate= 1 $\mu\text{m/a}$, Permeabilität von Ton = $1\text{e-}20\text{ m}^2$, Permeabilität Verschlussbauwerk= $3,45\text{e-}19\text{ m}^2$
Alternative 1	Änderung zum Basisfall: Behälterkorrosionsrate = 50 $\mu\text{m/a}$
Alternative 2	Änderung zum Basisfall: Behälterkorrosionsrate = 100 $\mu\text{m/a}$
Alternative 3	Änderung zum Basisfall: Behälterkorrosionsrate = 0 $\mu\text{m/a}$
Alternative 4	Änderung zum Basisfall: Permeabilität Verschlussbauwerk = $3,45\text{e-}17\text{ m}^2$
Alternative 5	Änderung zum Basisfall: Permeabilität Verschlussbauwerk = $1.\text{e-}15\text{ m}^2$
Alternative 6	Änderung zum Basisfall: primäre horizontale Wasserströmung mit dem Druckgradient 0,15 MPa/m
Alternative 7	Änderung zum Basisfall: primäre vertikale Wasserströmung mit dem Druckgradient 0,15 MPa/m
Alternative 8	Änderung zum Basisfall: Permeabilität vom Tongestein = $1\text{e-}22\text{ m}^2$

Tabelle 5.7: Im Arbeitspaket 5.3 für das Modell mit Vorkehrung zur Rückholung berücksichtigte Rechenfälle.

Rechenfall	Beschreibung
Basisfall	Behälterkorrosionsrate=1 $\mu\text{m/a}$, Permeabilität von Ton = $1\text{e-}20\text{m}^2$, Permeabilität Verschlussbauwerk= $3,45\text{e-}19\text{ m}^2$
Alternative 1	Änderung zum Basisfall: primäre vertikale Wasserströmung mit dem Druckgradient 0,15 MPa/m
Alternative 2	Änderung zum Basisfall: Mächtigkeit des Tongesteins = 100m, Abstand zwischen dem Grubengebäude und Überwachungssohlen = 20m
Alternative 3	Änderung zum Basisfall: Änderung zum Basisfall: Mit Beobachtungsbohrungen

Die Modellierung erfolgt beispielhaft für eine Actinidenzerfallskette („4n+1“ Zerfallskette mit ^{241}Am , ^{237}Np , ^{233}U , ^{229}Th und ^{209}Bi) sowie für das Spaltprodukt ^{36}Cl .

Die Löslichkeitsgrenzen der Actiniden im Grundwasser werden als konstante Randbedingungen an den Abfallbehältern angesetzt. Es werden Löslichkeitsgrenzen der Actiniden einer wässrigen Lösung (pH = 8) verwendet, da das Szenario aus den Simulationsergebnissen von AP 5.2 und 6.7 abgeleitet wird, für die das nahezu pH-neutrale Grundwasser aus dem Wirtsgestein statt durch das Verschlussbauwerk in den Endlagerbereich eintritt und die radioaktiven Abfälle angreift. Für das Spaltprodukt ^{36}Cl wird keine Löslichkeitsgrenze, sondern eine Schätzung des endgelagerten ^{36}Cl -Inventars verwendet. Da das Inventar stark von der Zwischenlagerzeit, dem Abbrand des Kernbrennstoffs usw. abhängt, wurde bei der Modellierung ein sehr konservativer konstanter Schätzwert unterstellt. Die Daten für die Konzentrationsrandbedingung stammen aus geochemisch-thermodynamischen Rechnungen des KIT-INE. Die Berechnung der Löslichkeitsgrenzen von Americium-, Neptunium-, Thorium- und Uranfestphasen, die mit dem Softwareprogramm PHREEQC v3.4 (Parkhurst u. Appelo, 2013) vom KIT-INE durchgeführt wurde, basiert auf den geochemischen Randbedingungen einer generischen Tonformation in Süddeutschland. Die thermodynamischen Daten der Rechnungen stammen aus den international anerkannten Datenbanken „NEA-TDB“ (NEA) und „ThermoChimie“ v.9 (Grivé u. a., 2015). Generell wurde die Bildung von Festphasen geringer Kristallinität an Stelle der Bildung von hochkristallinen Phasen in den Rechnungen berücksichtigt, da die Ausfällung der geringer kristallinen Phasen unter den Endlagerbedingungen bevorzugt werden. Daher stellen diese geringer kristallinen Festphasen in der Anfangsphase eines Porenwasserkontakts mit den Abfallprodukten die löslichkeitskontrollierenden Festphasen dar. Die primären Radionuklidquellterme, die vom KIT-INE unter anderem für die generische Tonformation in Süddeutschland im AP 4.4 abgeleitet wurden, unterscheiden sich im Fall von Americium und Uran von den in Tab. 5.8 angegebenen Löslichkeitsgrenzen, da im AP 4.4 die geochemischen Randbedingungen näher untersucht und weiter differenziert wurden (siehe Tabelle 5.4 im Abschnitt „Radionuklidquellterme für verschieden Entsorgungsoptionen“ des TP4).

Für die Modellierung der Sorption an der Feststoffmatrix wird das lineare Kd-Konzept unterstellt. Die genutzten Kd-Werte stammen aus (Baeyens u. a., 2014; Ochs u. a., 2016), die ebenfalls von KIT-INE empfohlen wurden.

Tabelle 5.8: Löslichkeitsgrenzen (Quellterme) und Kd-Werte der berücksichtigten Radionuklide.

Isotop	Quellterm	Kd-Wert (log L/kg)
²⁴¹ Am	1,54E-03 kg/m ³	Tongebirge = 4,23; Bentonit = 4,00 bis 4,70; Verschlussbauwerk = 4,6 bis 5,18
²³⁹ Np	2,39E-07 kg/m ³	Tongebirge = 4,74; Bentonit = 4,80 bis 5,57; Verschlussbauwerk = 2,48 bis 5,15
²³³ U	6,68E-06 kg/m ³	Tongebirge = 4,31; Bentonit = 1,40 bis 1,6; Verschlussbauwerk = 2,70 bis 5,83
²²⁹ Th	1,36E-04 kg/m ³	Tongebirge = 4,40; Bentonit = 4,80 bis 5,80; Verschlussbauwerk = 6,70
²⁰⁹ Pb	0 kg/m ³	Keine Daten
³⁶ Cl	1,14E-04 kg/m ³	Keine Daten

Für die Kd-Werte im Bentonit, Verschlussbeton und Tongestein wurden vom KIT-INE Bandbreiten zur Verfügung gestellt, siehe Tabelle 5.8. Als konservative Annahmen wurden für die deterministischen Rechnungen jeweils die unteren Grenzen der Kd-Werte verwendet. Für ²⁰⁹Pb und ³⁶Cl stehen keine Daten zur Verfügung, daher wurden die Kd-Werte für diese beiden Nuklide auf 0 gesetzt. Es wurde ein molekularer Diffusionskoeffizient von $7,3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ für alle berücksichtigten Radionuklide unterstellt.

Ergebnisse

Im Vorhaben wurden einzelne Aspekte der Optionen anhand von Referenzmodellen auch im Hinblick auf die Bewertungsgrundlagen exemplarisch untersucht. Im Rahmen von AP5 wurden Werkzeuge für die Modellierung von Nuklidtransportvorgängen im verschlossenen Tiefenlagersystem entwickelt und zu Demonstrationszwecken beispielhaft Rechnungen aufgrund stark vereinfachender Modellannahmen durchgeführt. Die hier dargestellten Ergebnisse sind daher lediglich als Anwendungsbeispiele und nicht als Optionenvergleich zu verstehen.

Die wichtigsten Simulationsergebnisse sind die zeitabhängigen Konzentrationsverteilungen der Radionuklide. Beispielhaft wird hier die Konzentrationsverteilung von ²³³U im Basisrechenfall dargestellt. In Abbildung 5.58 a und b ist zu erkennen, dass die Ausbreitung von ²³³U aufgrund der dominierenden Sorption im Bentonit und im Tonstein räumlich sehr begrenzt ist. Die Migrationsrechnungen für die anderen Actiniden zeigen ähnliche Ergebnisse. Anders als bei Actiniden kann ³⁶Cl weiter migrieren,

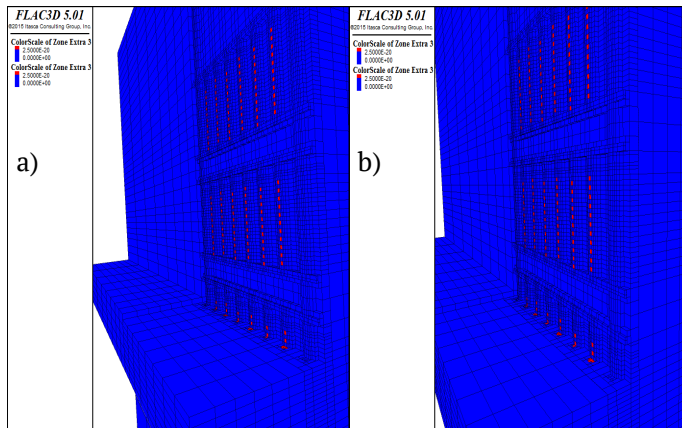


Abbildung 5.58: Konzentrationsverteilung von ^{233}U nach a) 30.000 Jahren, b) 1 Mio. Jahren.

da der Kd-Wert mit 0 angenommen wurde. Die Konzentrationsverteilungen von ^{36}Cl zu unterschiedlichen Zeitpunkten werden in Abbildung 5.59 dargestellt. In dieser Abbildung sind diejenigen Gebiete, für die eine Kon-

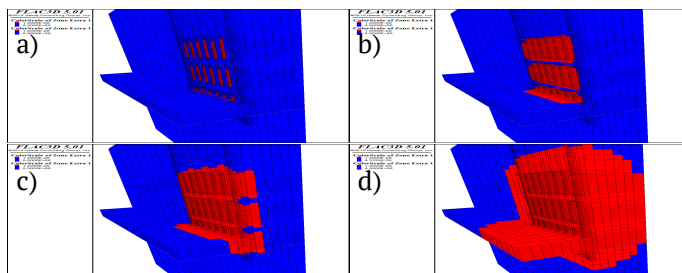


Abbildung 5.59: Konzentrationsverteilung von ^{36}Cl in kg/m^3 nach a) 1.000 Jahren, b) 30.000 Jahren, c) 100.000 Jahren, d) 1.000.000 Jahren.

zentration von mehr als $1,2 \cdot 10^{-8} \text{ kg}/\text{m}^3$ (Wert abgeleitet aus der Freigabegrenze für ^{36}Cl der StrlSchV (StrlSchV, 2012)) rot eingefärbt. Am Ende der Simulation hat dieser rote Bereich die Grenze zwischen dem Wirtsgestein

und dem Deckgebirge erreicht. Das liegt an den drei extrem konservativen Modellannahmen:

1. Der Kd-Wert von ^{36}Cl wurde auf 0 festgelegt.
2. Es wird unterstellt, dass alle Abfallbehälter direkt nach dem Verschluss des Grubengebäudes versagen.
3. Die Konzentrationsrandbedingung an den Abfallbehältern bleibt immer konstant bei $1,14 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ während des Analysezeitraums von 1 Mio. Jahre, obwohl die Halbwertszeit von ^{36}Cl $3,01\text{E}+05$ Jahre beträgt.

Zum Vergleich der Ergebnisse für unterschiedliche Rechenfälle wurden „Beobachtungspunkte“ in den Modellen ausgewählt. Die Beobachtungspunkte im 400 m-Modell sind die Punkte, die sich 4 m, 9 m, 20 m, 150 m und 180 m über dem Grubengebäude befinden. Beim 100 m-Modell liegen die Punkte 4 m, 9 m, 20 m, 35 m und 50 m über dem Grubengebäude. Für

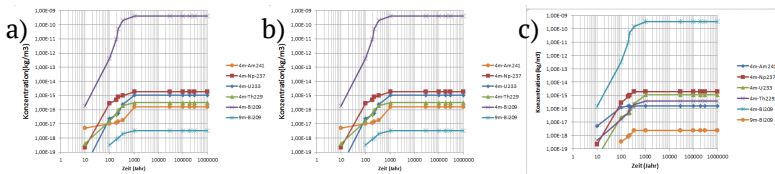


Abbildung 5.60: Konzentrationsverlauf der Actiniden an den Beobachtungspunkten über 1 Mio. Jahre a) im Basisrechenfall für das 400 m-Modell, b) im achten alternativen Rechenfall (Perm. von Tongestein = $1.0 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$) für das 400 m-Modell, c) im Basisrechenfall für das 100 m-Modell.

die vier Radionuklide (^{241}Am , ^{237}Np , ^{233}U , ^{229}Th) der $4n+1$ -Zerfallskette wurden wegen der starken Absorption für alle Rechenfälle nur im ersten (4 m) Beobachtungspunkt Konzentrationen von mehr als 10^{-19} kg/m^3 errechnet. Eine Nutzung der Ergebnisse für einen Optionenvergleich ist daher nicht sinnvoll. Das letzte Tochterisotop Bi-209 hat eine höhere Konzentration am 4 m Punkt gezeigt und den 9 m Punkt erreicht, obwohl dessen Konzentrationsrandbedingung an den Abfallbehältern auf 0 gesetzt wird. ^{209}Bi wird in diesem Modell wegen seiner extrem langen Halbwertszeit als stabiles Isotop betrachtet und sein Kd-Wert ist auf 0 gesetzt, daher kann es sich weiter als seine Mütter ausbreiten.

Aus Abbildung 5.60 a, b und c ist zu erkennen, dass der Nuklidtransport am 4 m-Punkt in unterschiedlichen Rechenfällen mit unterschiedlichen Mächtigkeiten des Tongesteins fast den identischen Konzentrationsverlauf erzeugt hat. Die maximale lokale Peclet-Zahl beim Basisrechenfall beträgt am Beginn der Simulation 0,18 und sinkt mit der Zeit schnell, da die von der Einlagerung erregte Wasserströmung im Endlagersystem sich nach der Betriebsphase bis zum primären hydraulischen Zustand reduziert, am Ende der Simulation (1 Mio. Jahre) beträgt die Peclet-Zahl nur noch $4,3 \cdot 10^{-4}$. Für die anderen Rechenfälle wurden ähnliche Werte für die Peclet-Zahl ermittelt. Daraus folgt, dass der Transport von Radionukliden im Modell von dem diffusiven Transport dominiert wird. Daher spielen die unterschiedlichen Strömungsfelder aus den unterschiedlichen Rechenfällen und Modellen eine untergeordnete Rolle.

Im Hinblick auf die Ziele des Vorhabens ist es von besonderer Bedeutung, die Rechenergebnisse zwischen den Modellen mit und ohne Vorkehrung zur Rückholung zu vergleichen. Dies ist hier für den Konzentrationsverlauf von ^{36}Cl beispielhaft dargestellt. Abbildung 5.61 a und b

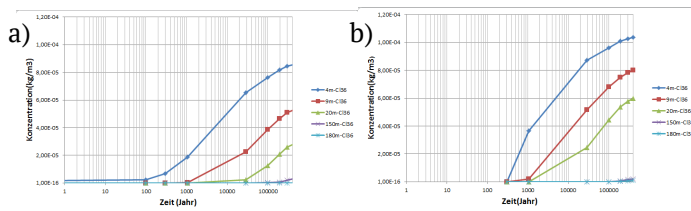


Abbildung 5.61: Konzentrationsverlauf von ^{36}Cl an den Beobachtungspunkten über 400.000 Jahre im Basisrechenfall a) für das 400 m-Modell, b) für das 400 m-Modell mit Überwachungssohle.

stellen den Konzentrationsverlauf von ^{36}Cl an den Beobachtungspunkten über 400.000 Jahre mit gleichen Randbedingungen dar. Die Simulationszeit beträgt beim Modell mit Überwachungssohle nur 400.000 Jahre, da die Simulation im Rahmen von AP 6.7 nur über diesen Zeitraum durchgeführt werden konnte und daher nur für diesen Zeitraum Strömungsdaten zur Verfügung standen. Um den Vergleich zu ermöglichen, werden auch für das Modell ohne Überwachungssohlen nur die Daten über 400.000 Jahre an dieser Stelle dargestellt. Im Vergleich kann man erkennen, dass die Konzentration von ^{36}Cl beim Modell mit Überwachungssohle etwas höher als beim Modell ohne Überwachungssohle ist, die Differenz beträgt

weniger als eine halbe Größenordnung. D. h., dass der Einbau der Überwachungseinrichtung eine erkennbare, aber nicht sehr starke beschleunigende Wirkung für die Migrationsprozesse des ^{36}Cl zeigt. Exemplarisch wurden zur Demonstration der verwendeten Werkzeuge auch probabilistische Rechnungen mit der Softwareplattform ReSUS durchgeführt. Für den Basisrechenfall für das 400 m-Modell mit und ohne Überwachungssohlen und Bohrlöchern wurden acht Parameter für die Actinidenzerfallskette probabilistisch betrachtet, die anderen wurden als deterministische Werte angenommen. Die statistischen Verteilungen der Parameter wurden aus Daten des KIT-INE abgeleitet. Die Größe der Stichprobe beträgt 100.

Tabelle 5.9: Statistische Verteilungsparameter für die probabilistische Analyse mit dem Code ReSUS.

Parameter	Statistische Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung	Einheit
Kd für ^{241}Am	Gauß	0,00423	0,001	m^3/kg
Kd für ^{237}Np	Gauß	0,00474	0,001	m^3/kg
Kd für ^{233}U	Gauß	0,00431	0,001	m^3/kg
Kd für ^{229}Th	Gauß	0,00440	0,001	m^3/kg
Löslichkeitsgrenze von ^{241}Am	Gauß	$1,54\text{E}-3$	$1,0\text{E}-4$	kg/m^3
Löslichkeitsgrenze von ^{237}Np	Gauß	$2,39\text{E}-7$	$1,0\text{E}-11$	kg/m^3
Löslichkeitsgrenze von ^{233}U	Gauß	$6,86\text{E}-6$	$1,16\text{E}-6$	kg/m^3
Löslichkeitsgrenze von ^{229}Th	Gauß	$1,36\text{E}-4$	$6,0\text{E}-7$	kg/m^3

Beispielhaft werden in Abbildung 5.62 die Häufigkeiten der maximalen Urankonzentration als Histogramm dargestellt. Ein Vergleich der Entsorgungsoptionen hinsichtlich der Migrationsprozesse ist allerdings nur unter realistischeren Modellannahmen und bei besserer Datenlage sinnvoll. In Abbildung 5.62 a und b ist zu erkennen, dass die maximalen Urankonzentrationen am Punkt 4m über dem Grubengebäude im Modell mit Überwachungssohle größer als die im Modell ohne Überwachungssohle sind. Die Ursache ist vermutlich, dass der Kd-Wert im Bentonit für Uran kleiner als im Ton-Wirtsgestein ist (Mittelwert von Kd= $1,4 \text{ l/kg}$ für Bentonit und $4,31 \text{ l/kg}$ für die Tonformation). Da die Überwachungssohle und die Bohrlöcher nach 300 Jahren mit Bentonit verfüllt werden sollen, wird ^{233}U weniger absorbiert als im Modell ohne Überwachungssohlen. In Abbildung 5.63 werden Streudiagramme dargestellt, die exemplarisch zur Demonstration des Vorgehens bei einer Sensitivitätsanalyse erstellt wur-

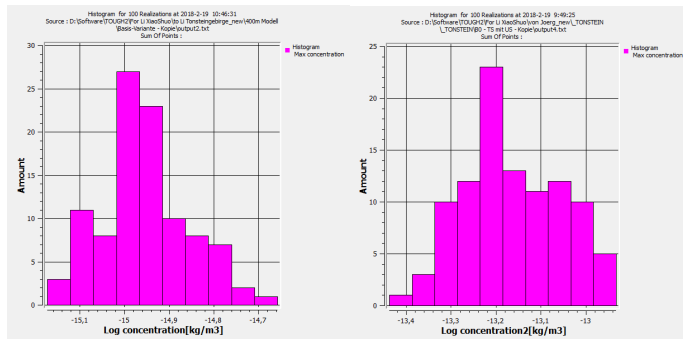


Abbildung 5.62: Histogramm der Logarithmen der Urankonzentrationen am Punkt 4 m über dem Grubengebäude im Modell ohne (links) und mit (rechts) Überwachungssohle und Bohrlöchern.

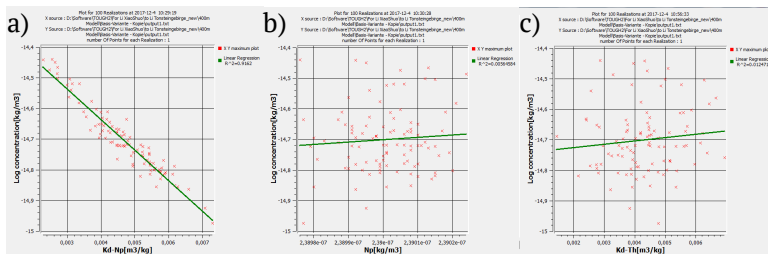


Abbildung 5.63: Streudiagramm zwischen den maximalen Konzentrationen von ^{237}Np am Punkt 4 m über dem Grubengebäude im Modell und a) den K_d -Werten von ^{237}Np , b) den Löslichkeitsgrenzen von ^{237}Np , c) dem K_d -Wert von ^{229}Th .

den. Abbildung 5.63 a zeigt, dass der Kd-Wert von ^{237}Np einen starken negativen Einfluss auf die Konzentration des freigesetzten Nuklids hat (Bestimmtheitsmaß etwa 0,92). Aus Abbildung 5.63 b kann man keine erkennbare Korrelation zwischen den Löslichkeitsgrenzen und den berechneten Konzentrationen von ^{237}Np feststellen, es ergibt sich ein entsprechend niedriges Bestimmtheitsmaß (etwa 0,01) für eine lineare Regression. Dies kann an der starken Dominanz des Kd-Wertes liegen. Abbildung 5.63 c steht beispielhaft für ein Streudiagramm, das richtigerweise keine Abhängigkeit zwischen den maximalen Konzentrationen von ^{237}Np am Punkt 4 m über dem Grubengebäude im Modell und dem Kd-Wert von ^{229}Th zeigt (Bestimmtheitsmaß etwa 0,01). Die Analyse mit diesem Transportmodell bei ReSUS hat generell plausible Ergebnisse gezeigt – es wurden einerseits plausible Sensitivitäten (Abhängigkeiten, hohes Bestimmtheitsmaß) ermittelt, andererseits aber keine „falsch-positiven“ Ergebnisse (also aus dem Modell heraus nicht erklärbare Abhängigkeiten) ermittelt.

5.5.3 Arbeitspaket 5.3 (IELF-MGS): Hydrogeochemische Transport-Modellierung zur Schadstoffausbreitung im Deckgebirge über einem tiefen Endlager für radioaktive Abfälle

Vorbemerkungen. Die Sicherheitskonzepte für eine wartungsfreie Entsorgung in tiefen geologischen Formationen ohne Rückholbarkeit basieren im Wesentlichen auf dem Sicherheitsnachweis für die technische (Behälter, Strecken- und Schachtverschlüsse) und die geologische Barriere (einschlusswirksamer Gebirgsbereich). Eine Sicherheitsbewertung umfasst zum einen die thermischen, hydraulischen und mechanischen Eigenschaften des Nah- und des Fernfeldes und zum anderen den chemischen und mineralogischen Stoffbestand von Lösungs-Festkörper-Systemen innerhalb des Wirtsgesteins. Da durch den Wärmeeintrag ein dynamisches System entsteht, in dem sich alle vier genannten Prozesse gegenseitig beeinflussen können, wurden Berechnungen zu THMC-Kopplungen in der Wirtsgesteinsinformation angestellt. Dabei wurden jedoch zu einer Reihe von Prozessen, die in diesem Zusammenhang auch eine Rolle spielen können, oft wenige bis gar keine quantitativen Betrachtungen angestellt. Das hier dargestellte Vorhaben geht der Frage nach den (A) Rückhalteeigenschaften ausgeschiedener Salzminerale gegenüber löslichen Radionukliden und der Frage der (B) Ausbreitung von Radionukliden im Grundwassersystem des überlagernden Deckgebirges nach.

Rückhaltepotential kristallisierender Salzminerale

Herkunft und Entwicklung salinarer Lösungen . Salinare Lösungen in Tongesteinen und in Salzgesteinen stehen im Mittelpunkt von Überlegungen zum Transport von Radionukliden aus der Abfallmatrix durch das Wirtsgestein in das Deckgebirge und weiter in die Biosphäre. Wären solche Lösungen nicht vorhanden oder vernachlässigbar, könnte auf Berechnungen zur Radionuklid-Ausbreitung weitgehend verzichtet werden. Aus geologischer und geochemischer Sicht sind jedoch salinare Lösungen integraler Bestandteil des Wirtsgesteins. Weder Tonsteine noch Salzformationen sind ‚trocken‘. Wegen ihrer herausragenden Bedeutung in der Diskussion um räumliche und zeitliche Perspektiven in nuklearen Entsorgungsfragen lohnt es sich, der Frage nach dem Auftreten, der Herkunft und der Entwicklung solcher Fluide nachzugehen. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Temperatur-bedingte Änderung der Löslichkeit von Festkörpern (Fällung von Salzmineralen), die bei einer Migration aus dem Einlagerungsbereich in höhere Bereiche der Wirtsgesteinsformation (Salzstruktur) auftreten können.

Alle bisher untersuchten norddeutschen Salzformationen enthalten salzgesättigte Lösungen. Diese sind entweder a) seit der Bildung der Evaporite von ca. 250 Mill. Jahren im Salz vorhanden und damit genetisch integraler Bestandteil des Gesteinskörpers, sog. ‚primäre Lösungen‘, oder sind b) durch Wegsamkeiten über das Deckgebirge in den Salzstock migriert (‚sekundäre Lösungen‘). Bei der Untersuchung von Salzformationen können Zuflüsse sekundärer Lösungen geochemisch leicht erkannt werden. Die Untersuchungen am Salzstock Gorleben haben gezeigt, dass die an tektonischen Diskordanzen und an konkordanten Anhydrit-Flöz-Grenzen vorkommenden primären Salzlösungen räumlich begrenzt sind. Es gibt jedoch Anteile primärer Lösung, die mittels seismischer, elektrischer und elektromagnetischer Verfahren in ihrer räumlichen Ausdehnung in der Steinsalzmatrix nicht nachzuweisen sind. Nicht detektierbare Lösungsvorkommen, z. B. auf Korngrenzen, sind weit verbreitet und können wegen ihres Volumens von Bedeutung sein.

Salinare Lösungen in Salzgesteinsformationen. Bei der Eindunstung von abgeschnittenen Meeresbuchten werden zunächst Ca-Mg-Karbonate und Ca-Sulfate chemisch aus dem Meerwasser gefällt. Diese bilden das ‚Liegende‘ einer Salzabfolge. Bei weiterer Eindunstung setzt nach etwa 90 % Verlust des Lösungsmittels Wasser durch Überschreiten der Löslichkeitsgrenzen die Ausscheidung von Steinsalz ein. Beim Beginn der Ausscheidung von NaCl schwimmen unregelmäßig geformte (Hopper)-Kristalle in

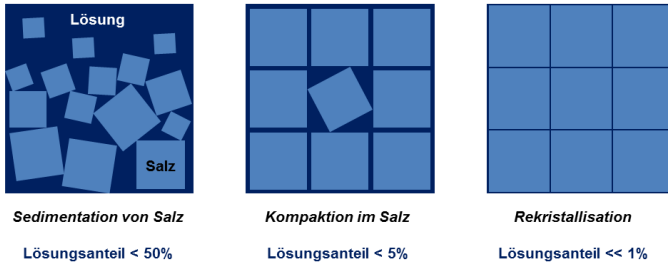


Abbildung 5.64: Kristallisation von Salzmineralen (hellblau) in hochsaliner Lösung (dunkelblau) mit fortschreitender Kristallisation/abnehmender Lösungsmenge von links nach rechts.

einer hochsalinen Lösung. Bei fortschreitendem Verlust des Lösungsmittels wird immer mehr Salz ausgeschieden, so dass das Verhältnis von verbleibender Lösung zum festen Salz immer kleiner wird. Da alle gebildeten Salzkristalle eine höhere Dichte aufweisen als die eindunstende Lösung, setzen sich die Festkörper am Boden des Eindunstungsbeckens ab und schließen dabei Reste der Lösung in Zwickeln und auf Kornrändern ein. Auf diese Weise endet eine Salzabfolge immer mit einer Mischung von Festkörpern (Salzkristalle) und Flüssigkeit (hochsalinäre Lösung). Im Verlauf der weiteren geologischen Entwicklung werden Salzabfolgen komprimiert; unter erhöhtem Druck und erhöhter Temperatur beginnt die Verdichtung des Salzgesteins durch Kristallwachstum bei gleichzeitigem Auspressen der mobilen Phase. Insgesamt vermindern sich die Lösungs-/Festkörper-Verhältnisse von hohen Anteilen zu $\ll 1\%$ (siehe Abb. 5.64). Es ist unbekannt, welche Menge an hochsalinärer Lösung eine Salzformation durch Kompaktion und Rekristallisation im Verlaufe von diagenetischen Prozessen und bei der Halokinese verliert. Mikroskopische Untersuchungen an Steinsalz lassen jedoch immer Reste von Lösung auf Korngrenzen (interkristallin) oder als Flüssigkeitseinschlüsse innerhalb von Kristallen (intrakristallin) erkennen. Die chemische Zusammensetzung dieser Lösungen ist grundsätzlich MgCl_2 -dominiert. Es stellt sich die Frage, wie und ob solche Lösungsreste für Reaktionen mit den Einlagerungsbehältern und weiter als Transportmittel für lösliche Radionuklide zur Verfügung stehen.

Verteilung und Migration von Salzlösung. Die quantitative Bestimmung geringer Lösungsgehalte in natürlichen Salzgesteinen ist analytisch sehr

schwierig. Die wenigen vorliegenden Untersuchungen machen Gehalte $\leq 0.1\%$ für norddeutsche Salzstöcke wahrscheinlich (Bornemann u. a. (2008) und weitere Zitate darin). Wenn diese Lösungsmengen auf Korngrenzen gespeichert vorliegen, sind sie mit elektrischen und elektromagnetischen Erkundungsmethoden nicht zu erkennen. Da die Salzbewegungen vor etwa 50 bis 60 Mio. Jahren zum Stillstand gekommen sind, kann man davon ausgehen, dass die in Diapir-artigen Strukturen vorkommenden Salzmassen in einigen 100 bis einigen 1.000 m Tiefe solche Konzentrationen an inter- und intrakristalliner Lösung aufweisen. Daraus ergibt sich die Frage, welche Mengen an Lösung grundsätzlich als Reaktions- und Transportmedium verfügbar sind.

Nimmt man die genannte Konzentrationsangabe und bezieht diese auf einen Referenzblock von 100 m·100 m·100 m Kantenlänge, so ergeben sich Salzlösungsvolumina von 100 m³. Da die Lösung unter isotropen Druckbedingungen lange im Steinsalz gespeichert war, kann die Ausbildung differentieller Drucke durch Auffahren von untertägigen Hohlräumen die Migration von salinarer Lösung im Druckgefälle in Gang setzen, so dass Lösungen die Auflockerungszone und die aufgefahrenen Strecken erreichen. Das Beispiel der Zutritte von flüssigen Kohlenwasserstoffen auf der 830-m-Sohle mitten im Kernbereich der vorgesehenen Einlagerungszonen (z2 Knäuel- und Kristallbrockensalz) im Salzstock Gorleben zeigt, dass auf Korngrenzen gespeicherte Flüssigkeiten an der Kontur einer aufgefahrenen Strecke austreten können.

Wegen der Adhäsionskräfte zwischen Kristallkorn-Oberflächen und Lösungsfilmen kann allerdings nicht der gesamte Bereich ‚entwässert‘ werden sondern nur das Gesteinsvolumen der Auflockerungszone (siehe Abb. 5.65). Das bedeutet, dass ein erheblicher Teil der tiefer in der Gesteinsmatrix auftretenden Lösung nicht migrationsfähig ist, solange nicht weitere Druckgefälle erzeugt werden. Die Existenz von ‚Lösungstaschen‘ oder von lösungserfüllten Hohlräumen im Kubikmeter-Maßstab ist mit diesem Konzept nicht vereinbar – solche Bereiche wären bei elektromagnetischen Untersuchungen detektierbar. Die Migration von intrakristallinen Lösungen, sog. Fluid Inclusions, ist bei der hier skizzierten Migration nicht erfasst. Solche Lösungen stellen ein weiteres in der intakten Gesteinsmatrix disseminiertes Lösungsreservoir dar, welches bei der Aufheizung des Gebirges durch Wärmeabgabe der eingelagerten Behälter grundsätzlich in Richtung der Wärmequelle wandern würde.

Für die nachfolgenden Berechnungen und Überlegungen werden der Zutritt von nicht erkannten Lösungen zum Behälter und die Migration von kontaminierter Lösung aus dem Einlagerungsbereich über die Infrastrukturräume samt Schacht- und Streckenbauwerken angenommen.

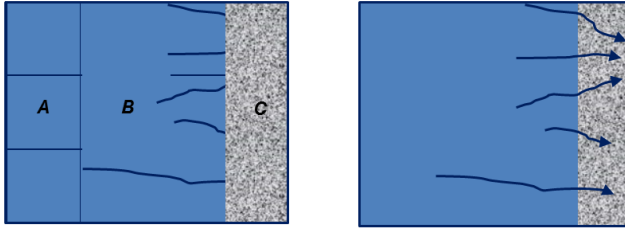


Abbildung 5.65: Austrag interkristalliner Lösung aus dem intakten Salzgebirge (A) über mechanisch überprägte Zonen im Steinsalz (B) bis in die Behältermatrix (verfüllte Strecke, grau, C) .

Des Weiteren werden zwei Migrationspfade angenommen, in denen Lösungstransport entweder über nicht erkannte tektonische Kontakte (z. B. Anhydrit-Bänke, kryogene Klüfte) oder über schadhafte Strecken- und Schachtverschlusssysteme erfolgt. Schließlich wird vorausgesetzt, dass eine unentdeckte, ausreichend große Menge MgCl_2 -dominierte Lösung in räumlicher Nähe zum Einlagerungsort vorhanden ist und mit einem Behälter bzw. dem darin enthaltenen Abfallinventar reagiert (siehe Abb. 5.66, „R“ und „Q“ sind Bezeichnungen für häufige MgCl_2 -reiche Salzlösungen). Durch Abkühlung und Teilkristallisation kommt es entsprechend des Temperaturgradienten beim Übergang ins Deckgebirge zur chemischen Veränderung der R/Q-Lösung. Dieser Ansatz ist ein Szenario, das auf der grundsätzlichen Annahme basiert, dass keiner der genannten Sachverhalte ausgeschlossen werden kann.

Verteilung von Spurenelementen zwischen abkühlender Lösung und Salzmineralen. In der Kristallisation von Salzmineralen aus kontaminierten hochsalinaren Lösungen liegt ein Potential zur Immobilisierung leicht löslicher Radionuklide in den Kristallgittern von Salzmineralen, die als ‚Bodenkörper‘ in der aufsteigenden und abkühlenden Lösung ausfallen und der weiter migrierenden Lösung entzogen werden. Zu diesem Ansatz lassen sich folgende konzeptionelle Fragen als Arbeitshypothesen zu einer möglichen Schadstoffausbreitung aus dem Einlagerungsbereich in das Deckgebirge verbunden mit der Immobilisierung von Radionukliden durch fortschreitende Kristallisation formulieren:

1. Welche Salzminerale fallen aus einer hochsalinaren Lösung aus, wenn diese den Einlagerungsbereich durch geologisch oder tech-

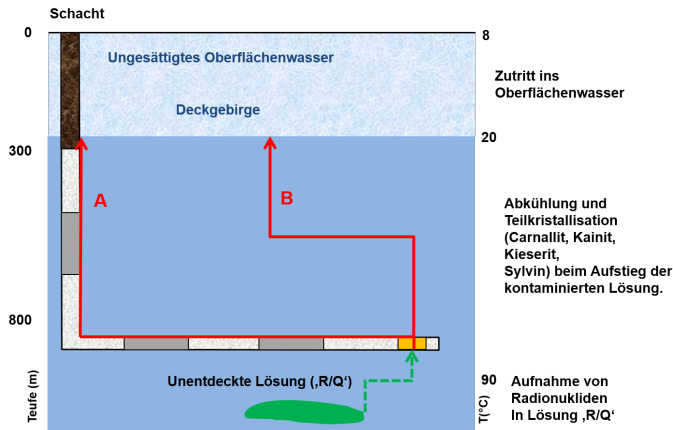


Abbildung 5.66: Zutritt von unentdeckten hochsalinaren Lösungen und Versagen eines Behälters. Mögliche Szenarien: Transport entlang von A) technischen Barrieren, B) Wegsamkeiten der geologischen Barriere.

nisch angelegte Wegsamkeiten verlässt und in das Deckgebirge migriert und dabei abkühlt?

2. Werden Radionuklide in ausfallende Salzminerale derart eingebaut, dass sie einen Gitterplatz in den Mineralen besetzen und
3. welche quantitative Aussage kann man aus der fraktionierten Kristallisation hinsichtlich der Änderung von Schadstoffkonzentrationen in einer hochsalinaren Lösung erhalten?

Zu 1) Es werden Berechnungen mittels PHREEQC (Parkhurst u. Appelo, 1999) in Kombination mit der Datenbank „THEREDA_PIT_PHRC_r01“ (Altmaier u. a., 2011) zur systematischen Untersuchung von Kristallisationsabläufen der K-Mg-Salze im chemisch quinären System durchgeführt mit dem Ziel, die modale Zusammensetzung der fraktionierten Festkörper zu ermitteln.

Zu 2) Im Bereich der Salzminerale gibt es hinsichtlich des Einbauvermögens von Schadstoffen als Spurenelemente auf Gitterplätzen nur eine schwache Datenbasis. Die wenigen Untersuchungen zum Einbau in Salzminerale sind im Rahmen der Fragestellung der Genese und Umbildung von Evaporiten für die Elemente Br und Rb durchgeführt worden (z.B. (van't Hoff, 1912; Jänecke, 1923; D'Ans, 1933; Braitsch, 1962; Mattenklott,

1994)). Mit dem Interesse an der Endlagerung von radioaktiven Reststoffen im Salinar begannen Forschungsarbeiten in dieser Richtung mit z. B. (Herrmann, 1979, 1980), sowie (Mattenklott, 1994) und (Siemann, 1995). Aus kristallchemischen Überlegungen sollte der Einbau von Cs in Carnallit auf der K-Gitterposition und von Co und Ni auf den Mg-Gitterplatz von Mg-Sulfaten und Mg-Chloriden bevorzugt erfolgen und damit die koexistierende Lösung an diesen Elementen bzw. Radionukliden deutlich verarmen. Daher sind Cs, Co und Ni als Beispiel Radionuklid-relevanter Spurenelemente zusammen mit den chemisch verwandten Spurenelementen Rb und Zn sowie dem Li und dem B als wichtige geochemische Tracer ausgewählt worden, um deren Einbau auf Gitterplätzen von Sylvit, Carnallit, Kainit und MgSO_4 -Phasen zu untersuchen.

Zu 3) Aus den PHREEQC-Berechnungen und den experimentellen Ergebnissen werden mittels Rayleigh-Fraktionierung und Gleichgewichtskristallisation die Spurenelementkonzentrationen in den residualen Lösungen berechnet. Dadurch ist eine Abschätzung des Rückhaltevermögens der hier untersuchten Salzminerale in Bezug auf Spurenelemente möglich.

Eine weitere Grundlage aller Überlegungen ist die seit langem bewährte Vereinfachung, dass primäre hochsalinare Restlösungen im quinären System Na-K-Mg- SO_4 -Cl ohne signifikanten Verlust an Informationen behandelt werden können.

Quinäres System. Mit dem quinären System lassen sich die Hauptkomponenten des Meerwassers mit Ausnahme von Ca^{2+} und von Karbonat hinreichend genau beschreiben. Calcium und Karbonat sind im eindunstenden Meerwasser als Spurenelemente in Konzentrationen von $<0,1$ Gewichtsprozent vorhanden. Mit dieser Einschränkung der Nichtbeachtung von Ca-Verbindungen und von Karbonat-Mineralen dient das quinäre System mit den Komponenten Na, K, Mg, SO_4 , Cl und H_2O seit über 100 Jahren zur Beschreibung natürlicher und technischer salinarer Lösungen und der mit ihnen im Gleichgewicht stehenden Festkörper. Für die Darstellung des quinären Systems bei unterschiedlichen Isothermen wird das Jänecke-Dreieck (Jänecke, 1923) genutzt. In Abb. 5.67 ist der Mg-reiche Teil des quinären Systems bei 35 und bei 83°C dargestellt. Die Lage der Gleichgewichtslösungen (Großbuchstaben), der Kristallisationsbahnen (dickgedruckt) sowie der Überschreitungslinien (dünngedruckt) werden anhand von Datensätzen, wie Harvie u. a. (1984): 25°C, (Gudowius, 1984): 25 - 83°C, und Usdowski u. Dietzel (1998): 25 - 79°C, berechnet. Auf Grund der Zuverlässigkeit bei höherer Temperatur bei (Gudowius, 1984) wird dieser dem Datensatz von (Usdowski u. Dietzel,

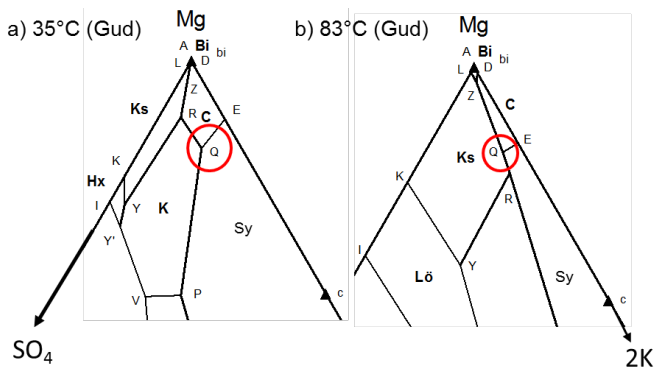


Abbildung 5.67: Die Lage der Gleichgewichtslösung Q bei 35 und 83°C im Jänecke-Diagramm nach den Daten von (Gudowius, 1984).

1998) vorgezogen. Die Veränderung von Lage und Größe der Stabilitätsfelder im quinären System mit der Temperatur wirkt sich auf den Mineralbestand aus, der sich aus einer abkühlenden kontaminierten salinaren Lösung während des Aufstiegs in Richtung Grundgebirge bildet. Beispielsweise stehen im quinären System am Punkt Q bei 35°C die Minerale Kainit ($\text{KMgClSO}_4 \cdot 2,75\text{H}_2\text{O}$), Carnallit ($\text{KMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) mit Sylvinit (KCl) im Gleichgewicht, bei 83°C dagegen die Minerale Kieserit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Sylvinit (KCl) und Carnallit ($\text{KMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), (siehe Abbildung 5.67).

Die Stabilitätsverhältnisse von Salzmineralen in Lösungen sind die Grundlagen für die Berechnung der Kristallisationsreihenfolge und der Festkörper-Paragenesen bei der Abkühlung einer hochtemperierten MgCl_2 -reichen Lösung aus dem Einlagerungsbereich zu „normalen“ Gebirgstemperaturen an der Unterseite des Deckgebirges. Es werden Temperaturen zwischen 83°C und 35°C bzw. 25°C betrachtet, weil hierfür die notwendigen thermodynamischen Daten vorliegen. Der Einbau von Spurenelementen in die jeweiligen Minerale erfordert neben den modalen Anteilen der Salzminerale an der Summe der ausgefallenen Festkörper vor allem zuverlässige Verteilungskoeffizienten. Diese Größe beschreibt für ein bestimmtes Spurenelement das Verhältnis der Konzentration im Festkörper zur Konzentration in der koexistierenden Lösung. Solche Daten lassen sich zwar qualitativ aus kristallchemischen Überlegungen ableiten, für eine Berechnung der Spurenelement-Anreicherung bzw. Spurenelement-Verarmung sind jedoch experimentell bestimmte Werte nötig. Bei genügend niedrigen Konzentrationen sind Verteilungskoeffizienten nicht von

den Spurenelementkonzentrationen im untersuchten System sondern nur von der Temperatur abhängig (Henry'sches Gesetz). Die experimentelle Bestimmung ausgewählter Spurenelemente, die sich entweder als Radionuklide in kontaminierten Lösungen befinden oder genetisch interessant sind, ist Gegenstand der nachfolgenden Beschreibungen. Im Anschluss werden die hier gewonnen Datensätze genutzt, um mit Hilfe der fraktionierten Kristallisation der Frage nachzugehen, welche potentiellen Kontaminanten auf dem Weg vom Einlagerungsbereich in das Deckgebirge hinein aus den Lösungen deutlich reduziert bzw. angereichert werden.

Experimenteller Ansatz

Lösungsentwicklung, Festkörper und Spurenelement-Fraktionierung. Auf Basis der Rayleigh-Fraktionierung (Uzdowski, 1975; Rollinson, 1993) sollen für die oben beschriebenen Szenarien anhand ausgewählter Spurenelemente Modellrechnungen für ein generisches Modell durchgeführt werden. Mittels Rayleigh-Fraktionierung (5.1) kann die Konzentration an Spurenelementen berechnet werden, die sich durch Fällungsprozesse in einer hochsalinaren Lösung einstellt. Die abkühlende Salzlösung verändert sich dabei kontinuierlich in ihrer Zusammensetzung.

$$C_{\text{Lsg}} = C_0 F^{D_{\text{ges}} - 1} \quad (5.1)$$

Dabei bezeichnet C_{Lsg} die Konzentration eines Elementes in der Lösung, C_0 dessen Anfangskonzentration, F den Anteil der verbleibenden Lösung (Fraktionierungsfaktor) ($F = 0$ bis 1 , wobei $F = 1$ gleichbedeutend ist mit 100 % Lösung) und D_{ges} den Gesamtverteilungskoeffizienten. Der Gesamtverteilungskoeffizient gibt die Elementverteilung eines Spurenelementes zwischen der Lösung und den daraus kristallisierten Phasen an. Dies ermöglicht die vollständige Bilanzierung eines Elementes, das grundsätzlich auch in verschiedene Minerale eingebaut werden kann, die gleichzeitig aus der Lösung ausfallen. Die Berechnung erfolgt als

$$D_{\text{ges}} = x_{xi} D_{xi} + x_{yi} D_{yi} + x_{zi} D_{zi} + \dots$$

$x_{xi, yi, zi, \dots}$ ist der Anteil einer kristallisierten Phase, die das Spurenelement i einbaut in Bezug auf die Summe aller Kristalle, $D_{xi, yi, zi, \dots}$ ist der Verteilungskoeffizient des Spurenelementes i in der kristallisierten Phase.

Berechnung der kristallisierenden Evaporitminerale. Für die Berechnung der Mineralphasen, welche sich unter den oben beschriebenen Bildungs-

und Umbildungsprozessen bei der Abkühlung MgCl_2 -dominierter Lösungen durch Aufstieg Richtung Deckgebirge bilden können, wurde das Programm PHREEQC (Parkhurst u. Appelo, 1999) in Kombination mit der Datenbank „THEREDA_PIT_PHRC_r01“ (Altmaier u. a., 2011) verwendet. Die Berechnung basiert auf der temperaturabhängigen Einstellung thermodynamischer Gleichgewichte bzgl. der betrachteten Salzphasen und den zugehörigen Konzentrationen der Hauptkomponenten der Lösungen. Zur Berechnung der Aktivitätskoeffizienten bei hoher Ionenstärke werden aus der Datenbank temperaturabhängige Pitzer-Parameter (Pitzer, 1987, 1991) herangezogen.

Die Datenbank „THEREDA_PIT_PHRC_r01“ kann von verschiedenen Softwareprogrammen genutzt werden und wurde von Altmaier u. a. (2011) getestet. Unterschiede bei der Berechnung von Gleichgewichtskonzentrationen und Ausfällungen für die Punkte Q und R des quinären Systems treten im Vergleich zu anderen Berechnungen (z. B. Usdowski u. Dietzel (1998) bei Temperaturen von größer 50°C vor allem für Sulfat-Konzentrationen auf. Die Ursachen dieser Unterschiede wurden schon von Altmaier u. a. (2011) diskutiert. Der THEREDA-Datensatz ist gegenwärtig die einzige Datenbank, die für eine temperaturabhängige Modellierung hochsalinärer Lösungen mittels PHREEQC zur Verfügung steht. Für die Modellierung wurde eine Q- bzw. R-Lösung bei 90°C entsprechend der im System zu erwartenden Salzminerale ins Gleichgewicht gesetzt und in einem Schritt auf 20°C abgekühlt. Die dabei ausgefallenen Salzminerale sind in Tabelle 5.10 dargestellt.

Die Berechnung der Kristallisationsschritte erfolgt dagegen in Temperaturschritten von 10°C . Das bedeutet für die Berechnung in PHREEQC, dass die bei der Auflösung bzw. Bildung der Salzminerale veränderten Konzentrationen der Salzlösung einschließlich des veränderten Wassergehalts im System für jeden Temperaturschritt der Modellierung exakt angepasst werden müssen. Die ausgeschiedenen Phasen werden während der Abkühlung von der Lösung getrennt. Bei der Ausfällung wurden nur Minerale berücksichtigt, die bei der jeweiligen Temperatur als thermodynamisch stabil gelten. Weitere Details sind der im Rahmen des Vorhabens erstellten Dissertation Voss (2015) zu entnehmen. In Tabelle 2 sind die Modellierungsergebnisse der einzelnen Temperaturschritte der fraktionierten Kristallisation der Q-Lösung im Vergleich mit der Gleichgewichtskristallisation einer Q- und R-Lösung in einem Fraktionierungsschritt von 90 auf 20°C zusammengefasst; die Massenanteile der jeweiligen Bodenkörper sind in Abbildung 5.68 dargestellt.

Tabelle 5.10: Ausgefallene Minerale bei der Fraktionierung einer Lösung der Zusammensetzung Q von 90 auf 20°C, in 10°C Temperaturschritten der Q- und R-Lösung in einem Schritt von 90 auf 20°C.

Temperaturstufen [°C]	Ausgefallene Mineralmassen [g]					
	Carnallit	Halit	Kainit	Kieserit	Sylvin	Summe
90 – 80	243	4,67	0,0	59,9	13,7	321
80 – 70	200	6,67	0,0	29,0	0,0	235
70 – 60	100	4,55	94,9	0,0	0,0	199
60 – 50	101	3,28	5,45	0,0	0,0	110
50 – 40	82,3	2,76	0,0	0,0	0,0	85,0
40 – 30	65,5	2,31	0,0	0,0	0,0	67,8
30 – 20	52,6	1,96	0,0	0,0	0,0	54,5

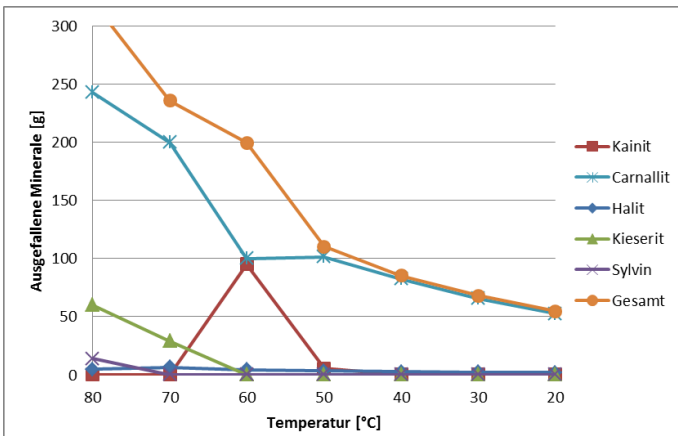


Abbildung 5.68: Ausfällung einzelner Minerale bei der Abkühlung einer Lösung Q von 90 auf 20°C.

Spurenelementverhalten bei Fraktionierung. Nachfolgend wird sowohl die Gleichgewichtskristallisation als auch die fraktionierte Kristallisation betrachtet. Die fraktionierte Kristallisation wird anhand einer Q-Lösung betrachtet, die von 90 auf 20 °C in 10 °C-Schritten abgekühlt wird. Bei der Gleichgewichtskristallisation wird sowohl eine Q-Lösung als auch eine R-Lösung in einem Schritt von 90 auf 20 °C abgekühlt.

Für die Verdeutlichung des Spurenelementverhaltens werden für beide Fälle die Berechnungen exemplarisch an einem kompatiblen Element ($D_{\text{ges}} > 1$) und einem inkompatiblen Element ($D_{\text{ges}} < 1$) durchgeführt. Bei allen K-haltigen Phasen, die anhand der PHREEQC-Modellierung ausfallen, wird Rb eingebaut; es dient als Beispiel für ein kompatibles Element. Als inkompatibles Element wird Zink gewählt. Anschließend werden die Berechnungen auf die Radionuklid-relevanten Spurenelemente Co und Cs übertragen und verglichen. Als Ausgangskonzentration ($C_{\text{textsubscript}0}$) wird für alle Rechnungen eine Konzentration von 1.000 ppm verwendet und der D_{ges} für Halit und Kieserit auf 0 gesetzt.

Gleichgewichtskristallisation. Bei der Gleichgewichtskristallisation berechnet sich die Konzentration eines Spurenelementes in der verbleibenden Restlösung nach Gleichung (5.2). Dafür wird in einem ersten Schritt der Gesamtverteilungskoeffizient D_{ges} berechnet. Hierfür wurde der Modal-Koeffizient X_{xi} , (als Fraktion von 1, Tabelle 5.11) und der Verteilungskoeffizient D_{xi} , für diese Minerale als Mittelwert aus allen Versuchstemperaturen benutzt.

$$C_{\text{Lsg}} = \frac{C_0}{F + D_{\text{ges}}(1 - F)} \quad (5.2)$$

Tabelle 5.11: Modal-Koeffizienten $X_{xi...}$ (als Fraktion von 1) umgerechnet aus den Ergebnissen der Gleichgewichtskristallisation aus PHREEQC (Tabelle 5.10); Verteilungskoeffizient $D_{xi...}$ für die einzelnen Minerale als Mittelwert aller Temperaturen und Lösungszusammensetzungen für Rb und Zn und der Radionuklid-relevanten Spurenelemente Co und Cs für die Berechnung des Gesamtverteilungskoeffizienten.

X_{Xi}	Carnallit	Halit	Kainit	Kieserit	Sylvin
R-Lösung (90 – 20)	0,62	0,04	0,29	0,00	0,06
Q-Lösung (90 – 20)	0,80	0,03	0,17	0,00	0,00
D_{Xi}					
D_{Rb}	31	0,0	1,7	-	1,2
D_{Zn}	0,05	0,0	0,12	-	0,05
D_{Co}	0,15	0,0	1,33	0,0	0,12
D_{Cs}	10,6	0,0	0,31	0,0	0,08

Die Berechnung von D_{ges} und C_{Lsg} für eine R-Lösung erfolgt nach

$$D_{gesRb} = 0,62 \cdot 31 + 0,04 \cdot 0 + 0,29 \cdot 1,7 + 0,06 \cdot 1,2 = 20,0$$

$$D_{gesZn} = 0,62 \cdot 0,05 + 0,04 \cdot 0 + 0,29 \cdot 0,12 + 0,06 \cdot 0,05 = 0,07$$

$$D_{gesCo} = 0,62 \cdot 0,15 + 0,04 \cdot 0 + 0,29 \cdot 1,33 + 0,06 \cdot 0,12 = 0,49$$

$$D_{gesCs} = 0,62 \cdot 10,6 + 0,04 \cdot 0 + 0,29 \cdot 0,31 + 0,06 \cdot 0,08 = 6,65$$

$$C_{LsgRb} = \frac{1000 \text{ ppm}}{0,73 + 20,01 \cdot (1 - 0,73)} = 165 \text{ ppm Rb}$$

$$C_{LsgZn} = \frac{1000 \text{ ppm}}{0,73 + 0,07 \cdot (1 - 0,73)} = 1329 \text{ ppm Zn}$$

$$C_{LsgCo} = \frac{1000 \text{ ppm}}{0,73 + 0,49 \cdot (1 - 0,73)} = 1158 \text{ ppm Co}$$

$$C_{LsgCs} = \frac{1000 \text{ ppm}}{0,73 + 20,01 \cdot (1 - 0,73)} = 400 \text{ ppm Cs}$$

und die Berechnung von D_{ges} und C_{Lsg} für eine Q-Lösung nach

$$D_{\text{gesRb}} = 0,80 \cdot 31 + 0,03 \cdot 0 + 0,17 \cdot 1,7 + 0,0 \cdot 1,2 = 25,5$$

$$D_{\text{gesZn}} = 0,80 \cdot 0,05 + 0,03 \cdot 0 + 0,17 \cdot 0,12 + 0,0 \cdot 0,05 = 0,06$$

$$D_{\text{gesCo}} = 0,80 \cdot 0,15 + 0,03 \cdot 0 + 0,17 \cdot 1,33 + 0,0 \cdot 0,12 = 0,23$$

$$D_{\text{gesCs}} = 0,80 \cdot 10,6 + 0,03 \cdot 0 + 0,17 \cdot 0,31 + 0,0 \cdot 0,08 = 8,56$$

$$C_{\text{LsgRb}} = \frac{1000 \text{ ppm}}{0,72 + 25,52 \cdot (1 - 0,72)} = 125 \text{ ppm Rb}$$

$$C_{\text{LsgZn}} = \frac{1000 \text{ ppm}}{0,72 + 0,06 \cdot (1 - 0,72)} = 1365 \text{ ppm Zn}$$

$$C_{\text{LsgCo}} = \frac{1000 \text{ ppm}}{0,72 + 0,23 \cdot (1 - 0,72)} = 1282 \text{ ppm Co}$$

$$C_{\text{LsgCs}} = \frac{1000 \text{ ppm}}{0,72 + 8,56 \cdot (1 - 0,72)} = 317 \text{ ppm Cs}$$

Vergleicht man die Ergebnisse für die Gleichgewichtskristallisation einer Q- und R-Lösung, so zeigt sich, dass bei der verbleibenden Q-Lösung noch 13 % Rb aber 137 % Zn der anfänglichen 1.000 ppm vorhanden sind. Bei einer R-Lösung würden noch 16,5 % Rb und 132,9 % Zn von der Anfangskonzentration verbleiben. Die Anreicherung des Zn um 33 % entspricht der Kristallisation von ca. 30 % Festkörper und somit einem Wert von $F = 0,7$. Im einfachsten Fall, wenn nämlich $D \ll 1$ ist, kann man den Wert gleich 0 setzen, wodurch sich ergibt, dass die Änderung der Spurenelementkonzentration der residualen Lösung in Bezug auf den Anfangswert ausschließlich vom Anteil der Restlösung abhängig ist. Das Radionuklid-relevanten Spurenelement Co zeigt ein vergleichbares Verhalten wie das Zn. Das Cs wird ähnlich stark wie das kompatible Rb in die Salzminerale eingebaut. Die Anfangskonzentration wird um knapp 60 % bei einer R-Lösung und um knapp 70 % bei einer entsprechenden Q-Lösung verringert.

Fraktionierte Kristallisation. Bei der fraktionierten Kristallisation muss der Gesamtverteilungskoeffizient D_{ges} für jede Temperaturstufe aus den Modal-Koeffizienten X_{Xi} (Tabelle 5.11 und den Verteilungskoeffizient D_{Xi} (Tabelle 5.13) der jeweiligen Temperaturstufe berechnet werden. Anders als bei der Gleichgewichtskristallisation ändert sich die Ausgangskonzentration (C_0) bei jedem Temperaturschritt. Für die Berechnung der Element-Konzentration in der residualen Lösung wird nur im ersten Abkühlungsschritt von 90 auf 80 °C die Ausgangskonzentration von 1.000 ppm gewählt. Für alle weiteren Schritte wurde dann die jeweilige Kon-

zentration C_{Lsg} , die sich im jeweils vorherigen Fraktionierungsschritt eingestellt hat, benutzt (Tabelle 5.14).

Tabelle 5.12: Modal-Koeffizienten X_{xi} (als Fraktion von 1) umgerechnet aus den Modellierungsergebnissen der fraktionierten Kristallisation aus PHREEQC (Tabelle 5.11).

X_{xi}	Carnallit	Halit	Kainit	Kieserit	Sylvin	Summe
90 – 80	0,76	0,01	0,00	0,19	0,04	1,00
80 – 70	0,85	0,03	0,00	0,12	0,00	1,00
70 – 60	0,50	0,02	0,48	0,00	0,00	1,00
60 – 50	0,92	0,03	0,05	0,00	0,00	1,00
50 – 40	0,97	0,03	0,00	0,00	0,00	1,00
40 – 30	0,97	0,03	0,00	0,00	0,00	1,00
30 – 20	0,96	0,04	0,00	0,00	0,00	1,00

Tabelle 5.13: Verteilungskoeffizient D_{xi} für die einzelnen Mineralphasen nach Temperaturstufen für Rb und Zn, sowie Co und Cs als Radionuklid-relevante Elemente. Die D-Mittelwerte für die Temperaturen 45 und 69 °C wurden interpoliert.

D-Mittelwert	25°C	35°C	45°C	55°C	69°C	83°C
Sy-Rb	1,9	1,1	1,0	0,92	0,91	0,90
C-Rb	22	42	32	22	19	16
K-Rb	1,7	1,4	1,7	2,0	2,0	-
Sy-Zn	0,054	0,046	0,049	0,053	0,046	0,038
C-Zn	0,059	0,039	0,057	0,075	0,066	0,057
K-Zn	0,080	0,095	0,12	0,14	0,14	-
Sy-Co	0,10	0,10	0,12	0,15	0,14	0,14
C-Co	0,24	0,24	0,19	0,13	0,12	0,11
K-Co	1,19	1,19	1,31	1,43	3,00	-
Sy-Cs	0,20	0,20	0,13	0,06	0,08	0,10
C-Cs	10,12	10,12	9,08	8,04	6,87	5,70
K-Cs	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12	-

In Tabelle 5.14 sind zusätzlich die verwendeten Gesamtverteilungskoeffizient D_{ges} und die Konzentration der residualen Lösung an Rb und Zn für alle Temperaturstufen der fraktionierten Kristallisation aufgeführt.

Im Ergebnis sind folgende Beziehungen festzuhalten: Das kompatible Rb wurde um fast 100 % reduziert und das inkompatible Zn um 40 % in der residualen Lösung angereichert. In Abb. 5.69 wird das unterschiedliche Verhalten der beiden Spurenelemente deutlich: Anreicherung des inkompatiblen Zn und Verringerung der Konzentration des Rb gegenüber

Tabelle 5.14: D_{ges} und C_{Lsg} in ppm für Rb und Zn der fraktionierten Kristallisation zusammen mit der prozentualen Änderung der Ausgangskonzentration C_0 .

T-Stufen [°C]	D_{ges} Rb	C_{Lsg} Rb	% Rb von C_0	D_{ges} Zn	C_{Lsg} Zn	% Zn von C_0
90 – 80	11,89	369	37	0,05	1091	109
80 – 70	13,31	152	15	0,05	1169	117
70 – 60	10,35	82	8,2	0,10	1240	124
60 – 50	20,19	39	3,9	0,08	1285	128
50 – 40	30,68	16	1,6	0,06	1323	132
40 – 30	40,17	6	0,6	0,04	1356	136
30 – 20	20,97	4	0,4	0,06	1382	138

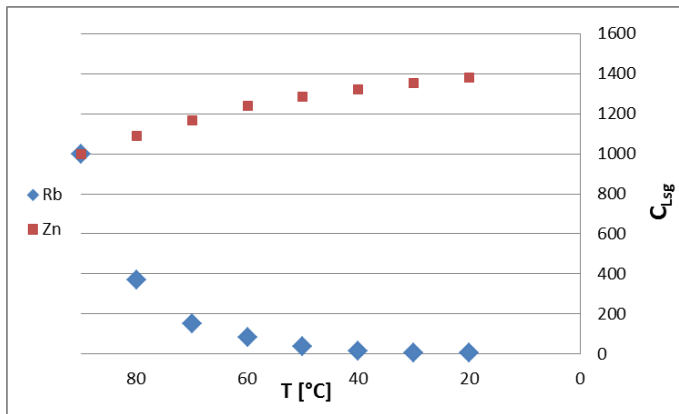


Abbildung 5.69: Lösungskonzentration von Rb (kompatibel) und Zn (inkompatibel) in Abhängigkeit von der Temperatur bei der fraktionierten Kristallisation.

den Ausgangskonzentrationen. Unter den Bedingungen der Gleichgewichtskristallisation verringert sich die Anfangskonzentration vom Rb um 83,5 % bei einer R-Lösung und um 87,5 % bei einer Q-Lösung, und die Konzentration von Zn steigt relativ um 32,9 % bei einer R-Lösung bzw. um 36,5 % bei einer Q-Lösung durch die Ausfällung von Salzmineralen ($F < 1$).

Nachfolgend werden die für Rb und Zn dargelegten Berechnungen auf die Elemente Cs und Co übertragen, da diese Elemente einen relevanten Anteil am Aktivitätsinventar haben können und in ihrem geochemischen Verhalten grundsätzlich dem Rb und dem Zn ähneln. Abbildung 5.70 zeigt, dass sich das Co bei der fraktionierten Kristallisation inkompatibel ver-

hält, obwohl Kainit ein $D > 1$ für Co aufweist. Der mittels PHREEQC berechnete Anteil von Kainit ist im Vergleich zum dominierenden Carnallit Anteil so gering, dass sich das Co in der residualen Lösung um fast 20 % anreichert. Allein beim Abkühlen von 70° auf 60°C wird eine ausreichende Menge an Kainit ausgefällt, die sich in der Abbildung 5.70 durch die Verringerung von C_{Lsg} zeigt. Das Cs dagegen zeigt ein kompatibles Verhalten, was sich aus dem Einbau in der dominierenden Mineralphase Carnallit mit einem $D > 1$ erklären lässt.

Tabelle 5.15: Verhalten der Spurenelemente Co und Cs der fraktionierten Kristallisation zusammen mit den verbleibenden Prozent der Ausgangskonzentration C_0 .

T-Stufen [°C]	D_{ges} Co	$CLsg$ Co	% Co von C_0	D_{ges} Cs	$CLsg$ Cs	% Cs von C_0
90 – 80	0,09	1089	109	4,32	731	73,1
80 – 70	0,10	1163	116	4,84	554	55,4
70 – 60	1,49	1128	113	3,50	474	47,4
60 – 50	0,189	1166	117	7,41	365	36,5
50 – 40	0,180	1195	120	8,78	288	28,8
40 – 30	0,269	1214	121	9,77	241	24,1
30 – 20	0,235	1233	123	9,76	202	20,2

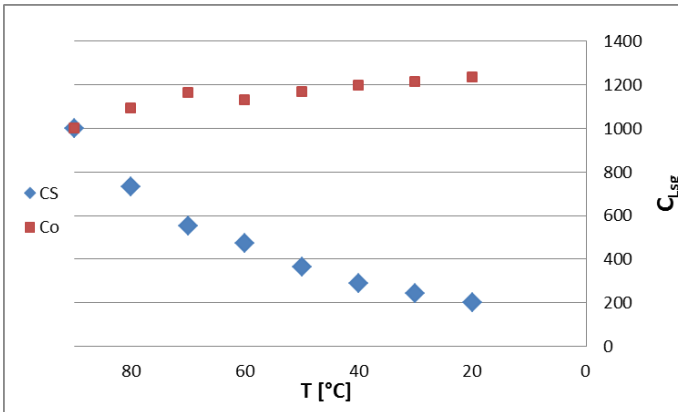


Abbildung 5.70: Lösungskonzentration von Cs (kompatibel) und Co (inkompatibel) in Abhängigkeit von der Restlösung F bei der fraktionierten Kristallisation entlang des Temperaturprofils von 90 auf 20°C.

Vergleicht man die möglichen Spurenelementkonzentrationen, welche nach Kristallisationsprozessen in das Deckgebirge treten können, so ist

zu erkennen, dass durch den Prozess der fraktionierten Kristallisation die Ausgangskonzentration bei kompatiblen Elementen stärker reduziert und bei inkompatiblen stärker angereichert wird als bei der Gleichgewichtskristallisation. Die hier durchgeführten Experimente und Berechnungen lassen sich ohne Einschränkung auf Spurenelemente übertragen, die als Radionuklide im hoch radioaktiven Abfall und in abgebrannten Brennelementen vorkommen. Besonders interessant ist eine weiterführende Betrachtung der beiden Cs-Isotope 135 und 137. Beide würden bei der Migration und Abkühlung von MgCl_2 -reichen Lösungen größtenteils durch den Einbau in Kristalle aus der Lösung entfernt und so dem migrierenden Lösungssystem entzogen werden. Die tatsächliche Minderung der Aktivitätskonzentration von ^{135}Cs und ^{137}Cs in den Restlösungen, die im weiteren Verlauf der Ausbreitung die Unterseite des Deckgebirges erreichen, hängt auch von der Migrationsgeschwindigkeit der Lösungen ab. Deren Migration in das Deckgebirge hinein und deren Ausbreitung in einem einfachen dynamischen grundwasserführenden System sind Gegenstand der nachfolgend zusammengefassten Überlegungen und Berechnungen.

Transport im Deckgebirge und im Grundwasserbereich

Im vorigen Abschnitt wurden folgende Migrationsschritte einer salzstock-internen Lösung betrachtet:

- Mobilisierung signifikanter Lösungsvolumina aus der Gesteinsmatrix,
- Kontamination mit löslichen Radionukliden,
- Ausbreitung entlang der technischen Barrieren
- Ausbreitung über geologische Störungssysteme
- Langsamer Austritt aus der Salzgesteinsformation in das Deckgebirge

Weder die einzelnen Schritte noch deren Kombination sind auszuschließen. Daher kann der Nachweis einer vollständigen stofflichen Integrität der Salzbarriere im Hinblick auf die Freisetzung kontaminierter hochsalinärer Lösungen in das Deckgebirge grundsätzlich nicht erbracht werden, allenfalls kann eine Abschätzung der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten angestellt werden. Daher wird hier der Versuch unternommen, die Ausbreitungsmöglichkeiten und -wege einer kontaminierten Salzlösung

im grundwassergesättigten Deckgebirge exemplarisch für einige sinnvolle aber vereinfachte Deckgebirgssituationen darzustellen.

Ausgehend von der Skizze in Abbildung 5.66 wird also davon ausgegangen, dass eine kontaminierte MgCl_2 -dominierte Lösung in das Deckgebirge und damit in den überlagernden Grundwasserbereich migrieren kann. Die Simulation der Ausbreitung gelöster Stoffe im Hangenden der Salzformation soll mittels Transport- und Strömungsmodellen erfolgen. Hierbei steht zunächst die methodische Entwicklung einer Kombination von PHAST mit RESUS im Vordergrund. Als Tracer werden wegen der langen Halbwertszeit das Uran und zwei radioaktive Cs-Isotope verwendet.

Grundwasserströmungsmodelle und Stofftransportmodelle. Die Modellierung hydrogeochemischer Prozesse in verschiedenen Grundwasserstockwerken wird meist zielgerichtet zur Lösung spezifischer Probleme eingesetzt und dient vor allem dem Prozessverständnis (Nordstrom, 2012). Zur Erarbeitung detaillierter Szenarien für die Schadstoffausbreitung im Wirtsgestein Salinargebirge und des darüber liegenden Deckgebirges sind hydrogeochemische Modellierungen notwendig. Entsprechende Stofftransportmodelle für das Deckgebirge wurden unter Nutzung der Software PHAST (Parkhurst u. a., 2010) entwickelt und auf ihre Eignung zur weiteren Auswertung in ReSUS (Li, 2015) von den Mitarbeitern des APs 4.1 „Langzeitsicherheit von Tiefenlagern“ getestet. Nach der Erarbeitung eines Basismodells (siehe Abbildung 5.71, mit den Randbedingungen Fluss und Grundwasserneubildungsrate von 125 mma^{-1}) wurden weitere Szenarien (Abbildung 5.72, die Angaben 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-6} und 10^{-8} m/s beziehen sich auf die hydraulische Leitfähigkeit der Schichten oberhalb des Salzspiegels) für unterschiedliche geologische Verhältnisse im Deckgebirge erarbeitet. Als Annahme für stoffliche Eigenschaften des Deckgebirges wurden die geologischen und hydrologischen Verhältnisse des Norddeutschen Beckens mit quartären und tertiären Sedimenten von ca. 400 m Mächtigkeit und einer durchschnittlichen Grundwasserneubildungsrate von 125 mma^{-1} gewählt.

Der Aufbau des Grundwasserströmungsmodells für das Deckgebirge mit Grundwasseroberfläche (m) über Modellsohle umfasst als Randbedingungen einen Fluss mit definiertem Wasserstand und eine konstante Grundwasserneubildungsrate sowie einen homogenen Grundwasserleiter mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von 0,0001 m/s. Die angenommenen Ausmaße des Grundwasserleiters betragen in x-Richtung 10.000 m, in y-Richtung 100 m und in z-Richtung 400 m (siehe Abb. 5.71). Für weitere Szenarien wurde dieser homogene Grundwasserleiter durch die Veränderung der Kf-Werte in verschiedene grundwasserstauende bzw. -leitende

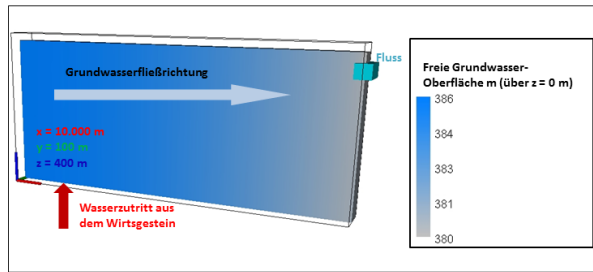


Abbildung 5.71: 3D-Grundwasserströmungsmodell und mit PHAST modellierte Grundwasserstände. Die aus dem Endlager in das Deckgebirge einströmende kontaminierte Lösung (rot) wird als Quelle in das Modell integriert und räumlich durch beliebige x- und y-Koordination bei $z = 0$ bestimmt.

Schichten untergliedert. Der Zustrom einer radionuklidhaltigen Lösung aus dem Endlagerbereich wird über einen Volumenstrom in z-Richtung (roter Pfeil in Abbildung 5.71) und eine Radionuklidkonzentration definiert. Als zeitliche Begrenzung für die Transportmodellierung wurden 10.000 Jahre gewählt. Die Wahl dieser Zeitspanne beruht auf der Beobachtung, dass im Bereich des heutigen Norddeutschen Beckens sämtliche hydrogeologischen Systeme entweder direkt oder indirekt auf die klimatischen Veränderungen im späten Quartär zurückzuführen sind. Die durchgeführten Modellierungen zur Ausbreitung von Radionukliden zeigen grundsätzliche Prozesse und Ausbreitungswege von kontaminierten Salzlösungen im Deckgebirge. Sie sind jedoch nicht in der Lage für einen bestimmten Standort detaillierte Prognosen zu erstellen.

Zunächst wird die Ausbreitung einer mit $10 \mu\text{g/L}$ Uran kontaminierten Salzlösung untersucht. Dies entspricht dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung, der umgerechnet $4,2 \cdot 10^{-5} \text{ mmol/L}$ beträgt. Aufgrund der langen Halbwertszeit der Uranisotope und des für die Modellierung gewählten Zeitraums von 10.000 Jahren kann der radioaktive Zerfall vernachlässigt werden. Die chemische Zusammensetzung des Grundwassers wurde vereinfacht. Das Grundwasser enthält nur Na und Cl mit jeweils 5 mmol/L .

Die zeitliche Entwicklung der Uran-Ausbreitung bei konstantem Volumenstrom und konstantem Uraneintrag aus dem Salzspiegel für das Szenario A und das Szenario B wird in Abbildung 5.73 bzw. Abbildung 5.74 dargestellt. Im erstgenannten wird eine homogene wassergesättigte Deckgebirgsschicht mit einem hohen Kf-Wert betrachtet; Tonlagen oder

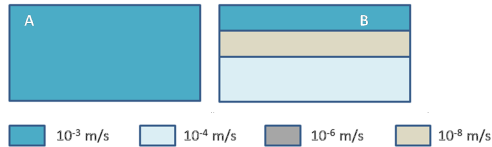


Abbildung 5.72: Profile zur Anordnung von Grundwasserleitern und Grundwasserstauern in zwei PHAST-Szenarien. Szenario A: Oberhalb des Salzstocks befindet sich sehr durchlässiges Lockermaterial; Szenario B: Über dem Salzstock liegt eine weniger durchlässige Gesteinsschicht, die von einer sehr undurchlässigen Schicht überlagert wird. Darüber liegt homogener, hoch durchlässiger Sand.

andere wasserstauende Einheiten sind nicht vorhanden. Im Szenario B enthält das Deckgebirge eine wasserstauende Schicht zwischen der Wirtsgesteinsformation und der Biosphäre. Für Szenario A wird eine Konzen-

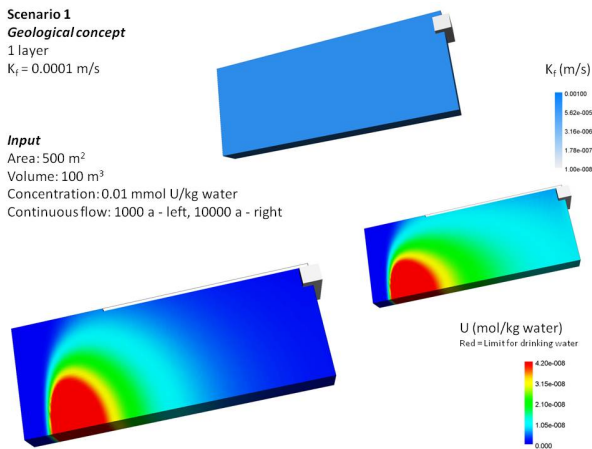


Abbildung 5.73: Urankonzentration nach 1.000 und 10.000 Jahren kontinuierlichen Zuflusses einer kontaminierten Lösung aus dem Endlagerbereich für das Szenario A.

tration von $1 \cdot 10^{-8}$ mol Uran pro Liter Lösung an der Oberseite des Modells, d. h. in der Biosphäre ($4 \cdot 10^{-8}$ mol U/L) nach wenigen tausend Jahren berechnet, der Wert ändert sich insoweit, als dass nach 10000 Jahren der Grenzwert von U im Trinkwasser knapp erreicht wird; der Ausbrei-

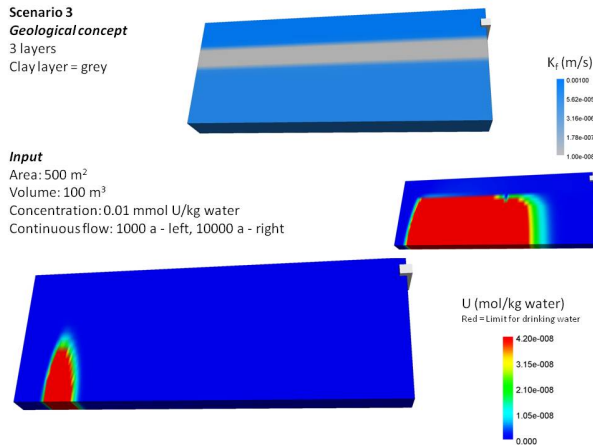


Abbildung 5.74: Urankonzentration nach 1.000 und 10.000 Jahren kontinuierlichen Zuflusses einer kontaminierten Lösung aus dem Endlagerbereich für das Szenario B.

tungsfächer in der Biosphäre ist wesentlich größer als nach 1.000 Jahren. Im Szenario B hemmen die grundwasserstauenden Schichten die Ausbreitung des Schadstoffs durch eine Verlangsamung der Transportgeschwindigkeit. Bei dieser Simulation ist es wahrscheinlich, dass es in den nächsten 10.000 Jahren nicht zu anthropogen bedingten Erhöhungen der Urankonzentration im obersten Teil des Deckgebirges kommt.

Kopplung von PHAST und RESUS. Durch die Kopplung von PHAST und RESUS konnten probabilistische Modellierungen zur Ausbreitung des Urans für die oben genannten Szenarien A und B mit der der Grundwasserströmung durchgeführt werden. Dazu wurden an ausgewählten Lokaltäten (bestimmt durch die Koordinaten x,y,z) Schadstoffkonzentrationen bei variierenden Eingabeparametern (z. B. Volumenstrom, Kf-Wert, Schadstoffkonzentration) über den Modellierungszeitraum von 0 bis 10.000 Jahren verglichen. Für die einzelnen Eingabeparameter wurden je 30 Einzelwerte erzeugt, mit denen dann PHAST-Modellläufe erfolgten. Durch den relativ einfachen Aufbau des Grundwassermodells und die Kombination von maximal drei zu variierenden Parametern wurden keine grundsätzlich neuen Erkenntnisse gewonnen. Die Ergebnisse der Kopplung von PHAST und ReSUS wurden überprüft. Die probabilistische Auswertung der Modellierungsergebnisse kann grundsätzlich auf kom-

plexere Modelle übertragen werden. Es ist jedoch empfehlenswert, bestimmte Parameterkopplungen, z. B. „worst case“-Szenarien, mit PHAST zu berechnen und die Ergebnisse für den gesamten Grundwasserleiter (dreidimensional) zu betrachten. Ein weiteres wesentliches Ergebnis dieser Arbeiten zur Kopplung der beiden Systeme war die Identifizierung von PHAST-Modellläufen, bei denen – vor allem in geologischen Szenarien mit überwiegend grundwasserstauenden Schichten – das Ende des Modellierungszeitraumes nicht erreicht wurde. Dabei zeigte sich, dass mit den Versionen 2 und 3 des Codes PHAST gleiche Modellvarianten unterschiedlich reagierten. Die Ursachen hierfür liegen vermutlich in der Programmierung der numerischen Iteration und den jeweils gewählten Toleranzkriterien.

Abschätzung der Ausbreitung der Radionuklide ^{135}Cs und ^{137}Cs im Deckgebirge. Hoch radioaktiver Abfall enthält die Radionuklide ^{135}Cs und ^{137}Cs . ^{135}Cs hat eine Halbwertszeit von 2,3 Millionen Jahren, das ^{137}Cs von 30,1 Jahren. Da die meisten Cs-Verbindungen in wässrigen Systemen einschließlich Salzlösungen leicht löslich sind, kann für beide Nuklide eine chemisch ungehinderte Ausbreitung angenommen werden. Da die betrachtete Ausbreitungsdauer 10.000 Jahre beträgt, muss die kurze Halbwertszeit des Radionuklids ^{137}Cs berücksichtigt werden, während die Halbwertszeit von ^{135}Cs vernachlässigt werden kann. Abbildung 5.75 zeigt die Überprüfung der eingegebenen kinetischen Reaktion für ein theoretisches Beispiel. Bedingt durch konstante Grundwasserneubildung wurde ^{135}Cs in die oberen Bereiche des Grundwasserleiters eingeleitet, so dass sich die Konzentrationsfahne gut sichtbar mit der Grundwasserströmung entwickelt.

Ausbreitung eines Radionuklids am Beispiel Cs. Abschließend soll der gesamte Prozess der lösungsbedingten Ausbreitung vom Abfallcontainer bis in die Biosphäre exemplarisch für freigesetztes Cs dargelegt werden. Das Cs wird verwendet, weil es keine Minerale gibt, die das Cs in der Biosphäre vollständig zurückhalten könnten. Allenfalls kann eine gewisse Rückhaltung durch Sorption oder durch Kationenaustausch an Smectiten erfolgen.

In Ermangelung anderer zuverlässiger und verwertbarer Daten wird hier bezüglich des Cs-Inventars im Abfall auf die Bilanzen von Herrmann u. Röthemeyer (1998) zurückgegriffen. Danach enthalten 1.000 kg verfestigten Wiederaufbereitungsabfalls eines Druckwasserreaktors ca. 2,6 g Gesamt-Cs. Der Temperaturanstieg durch die Einlagerung der Container mit radioaktivem Abfall im Wirtsgestein Steinsalz beträgt nach ungefähr

100 Jahren 90°C (z. B. Delisle (1980)). Bei diesen Temperaturen können salinare Lösungen mobilisiert werden und in Richtung des Abfallcontainers migrieren (Roedder u. Belkin, 1980). Für die weiteren Berechnungen wurde von einem Volumen der salinaren Lösung von 20 m³ ausgegangen, eine Größenordnung die von Bornemann u. a. (2008) als realistische Menge für den Kern eines Einlagerungsbereiches in steiler Lagerung – analog zum Kristallbrocken-, Knäuel- und Streifensalz- eingeschätzt wird. Die chemische Zusammensetzung der Lösung ist MgCl₂-reich (Q) und daher an Halit, Carnallit, Sylvin und Kainit gesättigt. Diese Salzlösung nimmt das in 1.000 kg Brennstoff enthaltene Cs vollständig auf und gelangt auf unentdeckten Klüften oder Rissen des Wirtsgesteins bzw. über die geotechnischen Barrieren in den Deckgebirgsbereich.

Beim Aufstieg der Lösung kommt es zu einer Abkühlung von 90°C auf etwa 20°C. Für die Berechnung der ausgefallenen Mineralmassen bei Abkühlung der Q-Lösung von 90 auf 20°C wurde das Programm PHREEQC (Parkhurst u. Appelo, 1999) in Kombination mit der Datenbank „THEREDA_PIT_PHRC_r01“ (Altmaier u. a., 2011) verwendet. Die Berechnung basiert auf der temperaturabhängigen Einstellung thermodynamischer Gleichgewichte bzgl. der betrachteten Salzphasen und den zugehörigen Gleichgewichtskonzentrationen der Lösungen. Zur Berechnung der Aktivitätskoeffizienten in den Lösungen hoher Ionenstärke werden in dieser Datenbank temperaturabhängige Pitzer-Parameter (Pitzer, 1987, 1991) herangezogen. Die Quellen für die in der Datenbank verwendeten Daten sind dokumentiert (Altmaier u. a., 2011). Die Mineral- / Lösungs-Verteilungskoeffizienten entsprechen den Angaben in Tabelle 5.13 und sind detailliert von Voss (2015) angegebenen. Im Ergebnis verbleibt nach der Teilkristallisation der MgCl₂-reichen Lösung eine hochfraktionierte Zusammensetzung mit 4 mg ¹³⁵Cs/L und 3 mg ¹³⁷Cs/L. Im Weiteren wurde angenommen, dass diese Lösung im Verlauf einer vernachlässigbar kurzen Zeitspanne von einem Jahr in die unteren Bereiche des Deckgebirges eindringt. Ihre weitere Ausbreitung wird mit Hilfe des für das Programm PHAST entwickelten geologischen Basisszenarien A und B (Abbildungen 5.72, 5.73 und 5.74) berechnet. Dabei wird der radioaktive Zerfall für ¹³⁷Cs berücksichtigt. Die Modellrechnungen erfordern immer eine Hintergrundkonzentration, zu der sich die Gehalte der kontaminierten Lösung addieren. Es bietet sich an, eine Cs-Konzentration zu wählen, die als radiologisch unbedenklich eingeschätzt wird. So wurde als nicht belasteter Hintergrund für die Gesamt-Cäsium-Konzentration 1·10⁻¹⁴ mol/L angenommen; dieser Wert liegt etwas unterhalb des von (EU, 2013) angegebenen Richtwertes von 11 Bq/L (2,5·10⁻¹⁴ mol/L). Die Modellie-

rungsergebnisse für ^{135}Cs und ^{137}Cs sind in den Abbildungen 5.75 und 5.76 dargestellt.

Grundlage der hier durchgeführten und in den Abbildungen 5.75 und 5.76 dargestellten dynamischen Verhältnisse ist das Konzept eines sich stetig erneuernden Grundwasser-Reservoirs, welches die einmal in das Betrachtungsvolumen (hier $10^4 \text{ m} \cdot 4 \cdot 10^2 \text{ m} \cdot 10^2 \text{ m}$) eingetragene Cs-Kontamination verdünnt. Das eingetragene Volumen beträgt 20 m^3 mit einer Konzentration von $4 \text{ mg } ^{135}\text{Cs/L}$ und $3 \text{ mg } ^{137}\text{Cs/L}$. Entsprechend liegen in dem verwendeten Volumen $80 \text{ g } ^{135}\text{Cs}$ und $60 \text{ g } ^{137}\text{Cs}$ vor. Diese können durch maximal $4 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ Grundwasser verdünnt werden. Entsprechend der hier angenommenen Grundwasserströmungsbedingungen und der für PHAST festgesetzten Randbedingungen ergeben sich die in den Abbildung 5.75 und 5.76 dargestellten Ausbreitungsfahnen. Diese sind im Wesentlichen an der Basis des Systems (Grundwasserleiter) verbreitet. Weil die Grundwasserströmungsgeschwindigkeit im tieferen Deckgebirge geringer ist als in oberflächennahen Bereichen, ist eine dispersionsbedingte Ausbreitung Richtung Oberfläche nicht zu erwarten.

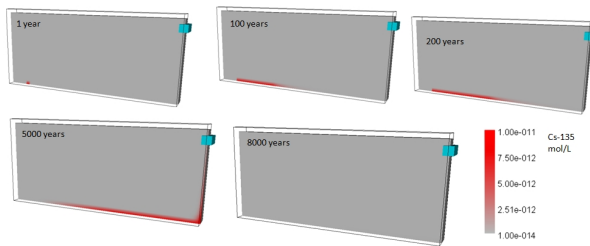


Abbildung 5.75: Zeitliche Ausbreitung des Radionuklids ^{135}Cs für das Szenario A. Die Auflösung der Konzentrationsfahne nach 8.000 Jahren beruht auf der Ausspülung durch nachstrebendes Grundwassers bezogen auf das statische Betrachtungsvolumen.

Trotz der Unsicherheiten der Eingabeparameter, vor allem für das aus dem Endlagerbereich austretende Lösungsvolumen, tragen die Modellierungsergebnisse zum Verständnis der Ausbreitung von Cäsium im Deckgebirge über einem Endlager im Salzgebirge bei. Hierbei bestimmen die Grundwasserströmungsbedingungen den Transport und die Verdünnung der eingetragenen Radionuklide. Entsprechend ihrer unterschiedlichen Halbwertszeiten verringert sich die ^{137}Cs -Konzentration wesentlich schneller als die ^{135}Cs -Konzentration. Im vorliegenden Szenario kann ^{137}Cs nach ca. 300 Jahren im Deckgebirge nicht mehr nachgewiesen wer-

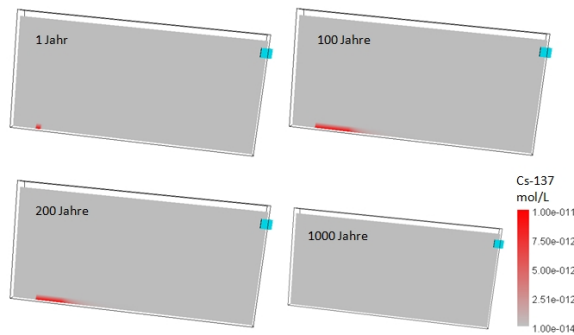


Abbildung 5.76: Zeitliche Ausbreitung des Radionuklids ^{137}Cs für das Szenario A. Die Auflösung der Konzentrationsfahne nach 1.000 Jahren beruht auf dem Zerfall des ^{137}Cs ($t/2 = 30,1$ a).

den, wohingegen ^{135}Cs für einen Zeitraum von mindestens 5.000 Jahren beobachtet werden muss. Die Skalierung der Konzentrationen und künftige Referenzwerte spielen bei der Datendarstellung und ihrer Interpretation eine entscheidende Rolle.

Für Sicherheitsüberlegungen zu Endlagerstandorten in einem Salzgestein sollten auch detaillierte Grundwasserströmungsmodelle und Stofftransportmodelle erstellt werden. Zur Modellierung bietet sich die Nutzung von RESUS in Kombination mit PHAST an. Vorab sollte jedoch eine gründliche Diskussion zur Eingrenzung sinnvoller Prognosezeiträumen erfolgen, da aktuelle Grundwassermodelle und Grundwasserströmungsraten empfindlich auf Klimaänderungen und anthropogene Eingriffe (Grambow u. Bretesché, 2014) reagieren können.

Schadstoffausbreitung unter veränderten geologischen Bedingungen. Die hier getroffenen Annahmen und Modellrechnungen gelten für die im norddeutschen Raum gegenwärtig beobachteten hydrogeologischen und stratigraphischen Verhältnisse. Diese Annahmen können in der Zukunft nicht mehr gelten, wenn sich sowohl die chemische Zusammensetzung und die Strömungsverhältnisse der Grundwasserleiter als auch die Lagerungsverhältnisse des gesamten Deckgebirges signifikant verändern. Diese Änderungen können ebenso durch ansteigende Pegelstände der Weltmeere als auch durch neuerliche Eisvorschübe ausgelöst werden – mit jeweils kontrastierenden geologischen Auswirkungen: Ein Meeresspiegelanstieg ändert die gesamte Chemie der Zusammensetzung der

Porenwässer der Lockermassen (Sande, Tone), die vormalig (also heute) unseren Lebensraum tragen. Letztendlich würden bisher vorherrschende stabile Gradienten von hochmineralisierten Wässern am Salz-Hut zu Oberflächenwässern mit Trinkwasserqualität stark abflachen. Eine neuerliche Kaltzeit würde zunächst den Meeresspiegel sinken lassen und gleichzeitig oder leicht zeitversetzt durch Inlandseisvorschübe zur Verlagerung der bisher dominierenden quartären Lockermassen im norddeutschen Raum führen. Hierbei kann zumindest lokal die Mächtigkeit des Deckgebirges sehr stark reduziert werden. Die Ausbildung glazigener Rinnen kann mehrere Hundert Meter vorhandenes Sediment ausräumen und – wie beim Salzstock Gorleben und weiteren Salzstrukturen, z. B. in Mecklenburg-Vorpommern – einen Kontakt von Eis und Salzkörper nach sich ziehen. Der nachfolgende Eisrückzug würde im Verlaufe des Wechsels von tief reichendem Dauerfrostboden über episodischen zu sporadischem Permafrost zu wiederum gemäßigt warmen Bedingungen in den obersten Schichten der glazial abgelagerten neuen Sedimente führen.

Es ist gegenwärtig nicht vorhersagbar, welches der beiden Szenarien – Meeresspiegelanstieg vs. Inlandseisvorschub – eintreten wird. Daher müssten alle Sicherheitsüberlegungen, die bezüglich des Nuklid-Inventars über die kommenden 10.000 Jahre hinausgehen, beide geologischen Entwicklungsfälle berücksichtigen.

Literatur

- [Altmaier u. a. 2011] Altmaier, Marcus; Brendler, Vinzenz; Bube, Christiane; Neck, Volker; Marquardt, Christian; Moog, Helge C.; Richter, Anke; Schrage, Tina; Voigt, Wolfgang; Wilhelm, Stefan; Willms, Thomas; Wollmann, Georgia: *THEREDA: Thermodynamische Referenz-Datenbasis. Abschlussbericht*. Köln: GRS, 2011 (GRS 265)
- [Baeyens u. a. 2014] Baeyens, B.; Thoenen, T.; Bradbury, M.H.; Marques Fernandes, M.: *Sorption Data Bases for Argillaceous Rocks and Bentonite for the Provisional Safety Analyses for SGT-E2* / Paul Scherrer Institut. Villigen, 2014 (12-04) – Forschungsbericht – 122 S.
- [Bechthold u. a. 1999] Bechthold, W.; Rothfuchs, T.; Poley, A.; Ghoreychi, M.; Heusermann, S.; Gens, A.; Olivella, S.: *Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project)*. 1999 (EUR 19124 EN) – Final Report

- [Blanco Martín u. a. 2015] Blanco Martín, Laura; Wolters, Ralf; Rutqvist, Jonny; Lux, Karl-Heinz; Birkholzer, Jens T.: Comparison of two simulators to investigate thermal-hydraulic-mechanical processes related to nuclear waste isolation in saliferous formations. In: *Computers and Geotechnics* 66 (2015), S. 219–229
- [Blanco Martín u. a. 2016] Blanco Martín, Laura; Wolters, Ralf; Rutqvist, Jonny; Lux, Karl-Heinz; Birkholzer, Jens T.: Thermal-hydraulic-mechanical modeling of a large-scale heater test to investigate rock salt and crushed salt behavior under repository conditions for heat-generating nuclear waste. In: *Computers and Geotechnics* 77 (2016), S. 120–133
- [Bornemann u. a. 2008] Bornemann, Otto; Behlau, Joachim; Fischbeck, Reinhard; Hammer, Jörg; Jaritz, Werner; Keller, Siegfried; Mingerzahn, Gerhard; Schramm, Michael; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.): Description of the Gorleben Site Part 3. Results of the geological surface and underground exploration of the salt formation / Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover, 2008 (3) – Forschungsbericht – 237 S.
- [Braitsch 1962] Braitsch, Otto: *Mineralogie und Petrographie in Einzeldarstellungen*. Bd. 3: *Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten*. Berlin: Springer, 1962
- [StrlSchV 2012] Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, für Gesundheit, für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: *Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV)*. 2012 – Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 7 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist
- [D’Ans 1933] D’Ans, Jean: *Die Lösungsgleichgewichte der Systeme der Salze ozeanischer Salzablagerungen*. Berlin: Verlag Gesellschaft für Ackerbau, 1933
- [Delisle 1980] Delisle, Georg: Berechnungen zur raumzeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes um ein Endlager für mittel- und hochaktive Abfälle in einer Salzformation. In: *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 131 (1980), S. 461–482

- [Filbert 2004] Filbert, Wolfgang: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Tongestein: Abschlussbericht / DBE Technology GmbH. A2: Vergleich der technischen Endlagerkonzepte im Wirtsgestein Salz und Ton / DBE Technology GmbH. 2004 – Forschungsbericht
- [Ghofrani 2016] Ghofrani, Javad: *Conceptualisation and Software Development of a Simulation Environment for Probabilistic Safety Assessments of Radioactive Waste Repositories*, Dissertation, 2016
- [Grambow u. Bretesché 2014] Grambow, Bernd; Bretesché, Sophie: Geological disposal of nuclear waste: II. From laboratory data to the safety analysis – Addressing societal concerns. In: *Applied Geochemistry* 49 (2014), Oktober, S. 247–258
- [Grivé u. a. 2015] Grivé, Mireia; Duro, Lara; Colàs, Elisenda; Giffaut, Eric: Thermodynamic data selection applied to radionuclides and chemotoxic elements: An overview of the ThermoChimie-TDB. In: *Applied Geochemistry* 55 (2015), April, S. 85–94
- [Gudowius 1984] Gudowius, E.: *Neue Auswertung bekannter und unveröffentlichter Untersuchungen am Kaliforschungs-Institut der Kali und Salz AG in Hannover*. 1984
- [Harvie u. a. 1984] Harvie, Charles E.; Møller, Nancy; Weare, John H.: The prediction of mineral solubilities in natural waters: The Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO₄-OH-HCO₃-CO₃-CO₂-H₂O system to high ionic strengths at 25°C. In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48 (1984), April, Nr. 4, S. 723–751
- [Herrmann u. Röthemeyer 1998] Herrmann, Albert G.; Röthemeyer, Helmut: *Langfristig sichere Deponien: Situation, Grundlagen, Realisierung*. Berlin: Springer, 1998
- [Herrmann 1979] Herrmann, Albert G.: Geowissenschaftliche Probleme bei der Endlagerung radioaktiver Substanzen in Salzdiapiren Norddeutschlands. In: *Geologische Rundschau* 68 (1979), Oktober, Nr. 3, S. 1076–1106
- [Herrmann 1980] Herrmann, Albert G.: Geochemische Prozesse in marinen Salzablagerungen: Bedeutung und Konsequenzen für die Endlagerung radioaktiver Substanzen in Salzdiapiren. In: *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 131 (1980), Januar, S. 433–459

- [ITASCA Consulting Group 2013] ITASCA Consulting Group: FLAC3D – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. 2013 – User's guide
- [Jänecke 1923] Jänecke, Ernst: *Die Wissenschaft*. Bd. 59: *Die Entstehung der deutschen Kalisalzlager*. 2. Aufl. Braunschweig: Vieweg & Sohn, 1923
- [Lampe u. a. 2017] Lampe, Bandon C.; Stormont, John C.; Lynn, Timothy D.; Bauer, Stephen J.: Potential Influence of Granular Salt on Cavern Stability. In: *Proceedings of the SMRI spring 2017 Technical Conference*. Albuquerque, NM, 2017
- [Larue u. a. 2013] Larue, Jürgen; Fischer, Bruno Baltes H.; Frieling, Gerd; Kock, Ingo; Navarro, Martin; Seher, Holger: *Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. Köln: GRS, 2013 (GRS 289)
- [Li 2015] Li, Xiaoshuo: *Entwicklung der Softwareplattform RESUS: Repository Simulation, Uncertainty propagation and Sensitivity Analysis*. Clausthal-Zellerfeld, Dissertation, 2015
- [Lux u. a. 2018] Lux, Karl-Heinz; Düsterloh, Uwe; Wolters, Ralf; Zhao, Juan; Rutenberg, Michael; Feierabend, Jörg; Pan, Tianjie; Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (Hrsg.): *Multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Möglichkeit eines direkten Monitorings - Ein Beitrag zur Verbesserung des geomechanischen und fluiddynamischen Systemverständnisses bei TH2M-gekoppelten Prozessen*. Bd. 23. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger Verlag, 2018
- [Lux u. a. 2015] Lux, Karl-Heinz; Rutenberg, Michael; Seeska, R.; Feierabend, Jörg; Düsterloh, U.: Kopplung der Softwarecodes FLAC3D und TOUGH2 in Verbindung mit in situ-, labo-rativen und numerischen Untersuchungen zum thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Tongestein unter Endlagerbedingungen. Clausthal-Zellerfeld, 2015 (FK 02 E 11041) – Abschlussbericht

[Lux u. a. 2017a] Lux, Karl-Heinz; Wolters, Ralf; Zhao, Juan: Auf dem langen Weg zu einem Endlager für hochradioaktive, Wärme entwickelnde Abfälle. Ein neuer konzeptionell-konfigurativer Ansatz und ein neues Simulationswerkzeug zur Erarbeitung eines verbesserten Prozess- und Systemverständnisses für HAW-Entsorgungsanlagen - ohne und mit direktem längerfristigem Monitoring. Teil I: Endlagerforschung zwischen den Anforderungen nach technischer Sicherheit und sozialer Gerechtigkeit. In: *atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie* 62 (2017), Nr. 3, 185–198. http://www.kernenergie.de/kernenergie-wAssets/docs/fachzeitschrift-atw/2017/atw_2017-03_185_Weg_zum_Endlager.pdf

[Lux u. a. 2017b] Lux, Karl-Heinz; Wolters, Ralf; Zhao, Juan: Auf dem langen Weg zu einem Endlager für hochradioaktive Wärme entwickelnde Abfälle – Ein neuer konzeptionell-konfigurativer Ansatz und ein neues Simulationswerkzeug zur Erarbeitung eines verbesserten Prozess- und Systemverständnisses für HAW-Entsorgungsanlagen – ohne und mit direktem längerfristigem Monitoring. Teil II: Der FTK-Simulator als neues Werkzeug zur Analyse fluiddynamischer Prozesse in einer HAW-Entsorgungsanlage. In: *atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie* 62 (2017), Nr. 4, 244–257. http://www.kernenergie.de/kernenergie-wAssets/docs/fachzeitschrift-atw/2017/atw2017_04_244_Weg_zum_Endlager_2.pdf

[Lux u. a. 2017c] Lux, Karl-Heinz; Wolters, Ralf; Zhao, Juan: Auf dem langen Weg zu einem Endlager für hochradioaktive Wärme entwickelnde Abfälle – Ein neuer konzeptionell-konfigurativer Ansatz und ein neues Simulationswerkzeug zur Erarbeitung eines verbesserten Prozess- und Systemverständnisses für HAW-Entsorgungsanlagen – ohne und mit direktem längerfristigem Monitoring. Teil III: Ein neues konzeptionelles und konfiguratives Konzept zur Entsorgung hochradioaktiver Wärme entwickelnder Abfälle. In: *atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie* 62 (2017), Nr. 5, 317–326. http://www.kernenergie.de/kernenergie-wAssets/docs/fachzeitschrift-atw/2017/atw2017_05_317_Weg_zum_Endlager_3.pdf

- [Lux u. a. 2017d] Lux, Karl-Heinz; Wolters, Ralf; Zhao, Juan; Rutenberg, Michael; Feierabend, Jörg; Pan, Tianjie; Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (Hrsg.): ENTRIA-Arbeitsbericht 07: TH2M-basierte multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle – Ein Beitrag zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz im Hinblick auf die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Clausthal-Zellerfeld, 2017 – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Mattenklott 1994] Mattenklott, Markus: *Die Bromid- und Rubidiumverteilung in Carnallitgesteinen: Kriterien für die Genese mariner Evaporite*. Clausthal-Zellerfeld, TU Clausthal, Diss., 1994
- [Moridis u. a. 1999] Moridis, G. J.; Wu, Y.; Pruess, K.: EOS9nT: A TOUGH2 module for the simulation of water flow and solute / colloid transport in the subsurface / Lawrence Berkeley National Laboratory. 1999 (LBNL-42351) – Forschungsbericht
- [Nordstrom 2012] Nordstrom, D. K.: Models, validation, and applied geochemistry: Issues in science, communication, and philosophy. In: *Applied Geochemistry* 27 (2012), Oktober, Nr. 10, S. 1899–1919
- [Ochs u. a. 2016] Ochs, Michael; Mallants, Dirk; Wang, Lian: *Radionuclide and metal sorption on cement and concrete*. Cham Heidelberg New York: Springer, 2016 (Topics in safety, risk, reliability and quality Volume 29)
- [NEA] OECD Nuclear Energy Agency: *Thermochemical Database (TDB) Project*. <https://www.oecd-neo.org/dbtdb/>,
- [Parkhurst u. Appelo 1999] Parkhurst, David L.; Appelo, C. A. J.: User's guide to PHREEQC (Version 2). A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations / U.S. Geological Survey : Earth Science Information Center. 1999 (99-4259) – USGS Numbered Series – 312 S.
- [Parkhurst u. a. 2010] Parkhurst, David .; Kipp, Kenneth L.; Charlton, Scott R.: PHAST Version 2. A Program for Simulating Groundwater Flow, Solute Transport, and Multicomponent Geochemical Reactions / U.S. Geological Survey. 2010 (6-A35) – USGS Numbered Series – 235 S.

- [Parkhurst u. Appelo 2013] Parkhurst, D.L.; Appelo, C.A.J.: *Description of input and examples for PHREEQC version 3—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods. Bd. 6. USGS, 2013
- [Pitzer 1987] Pitzer, Kenneth S.: A Thermodynamic Model for Aqueous Solutions of Liquid-Like Density. In: *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 17 (1987), Nr. 1, S. 97–142
- [Pitzer 1991] Pitzer, Kenneth S. (Hrsg.): *Activity coefficients in electrolyte solutions*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 1991
- [Project Opalinus Clay 2002] Project Opalinus Clay: *Models, Codes and Data for Safety Assessment. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis)*. Wettingen: Nagra, 2002 (Technical Report 02-06)
- [Pruess u. a. 1999] Pruess, K.; Oldenburg, C.; Moridis, G.: TOUGH2 User's Guide, Version 2.0 / Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, CA, 1999, 1999 (LBNL-43134) – Report
- [EU 2013] Rat der Europäischen Union: Festlegung von Anforderungen an den Schutz der Gesundheit der Bevölkerung hinsichtlich radioaktiver Stoffe in Wasser für den menschlichen Gebrauch / Amtsblatt der Europäischen Union L 296/12, 7.11.2013. <http://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/51/oj>. 2013 (2013/51/EURATOM vom 22. Oktober 2013) – Richtlinie
- [Roedder u. Belkin 1980] Roedder, Edwin; Belkin, H. E.: Thermal Gradient Migration of Fluid Inclusions in Single Crystals of Salt from the Waste Isolation Pilot Plant Site (WIPP). In: *Scientific Basis for Nuclear Waste Management*. Boston, MA: Springer US, 1980, S. 453–464
- [Rollinson 1993] Rollinson, Hugh R.: *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Harlow: Longman, 1993
- [Rutqvist 2011] Rutqvist, Jonny: Status of the TOUGH-FLAC simulator and recent applications related to coupled fluid flow and crustal deformations. In: *Computers & Geosciences* 37 (2011), Juni, Nr. 6, S. 739–750
- [Schmidt u. Kallenbach-Herbert 2017] Schmidt, G.; Kallenbach-Herbert, B.: VP5-Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit – Technik- und Sicherheitsaspekte. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover / Darmstadt, 2017 (9) – ENTRIA Arbeitsbericht

- [Siemann 1995] Siemann, Michael G.: *Geochemische Untersuchungen zur Entstehung der salinaren Lösungen im Bereich „Bunte First“ der Grube Marie im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben*. Clausthal-Zellerfeld, TU Clausthal, Diss., 1995
- [Torsæter u. Abtahi 2003] Torsæter, Ole; Abtahi, Manoochehr: *Experimental Reservoir Engineering Laboratory Work Book / Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics*, Norwegian University of Science and Technology. 2003 – Forschungsbericht
- [Usdowski u. Dietzel 1998] Usdowski, Eberhard; Dietzel, Martin F.: *Atlas and data of solid-solution equilibria of marine evaporites*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998
- [Usdowski 1975] Usdowski, Hans-Eberhard: *Fraktionierung der Spurenelemente bei der Kristallisation*. Berlin: Springer-Verlag, 1975
- [van't Hoff 1912] van't Hoff, Jacobus H.: *Untersuchungen über die Bildungsverhältnisse der ozeanischen Salzablagerungen*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1912
- [Voss 2015] Voss, Ina: *Die Verteilung löslicher Radionuklid-relevanter Spurenelemente zwischen Salzmineralen und salinaren Lösungen*. Clausthal-Zellerfeld, Dissertation, 2015
- [Wolters 2014] Wolters, Ralf: *Thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Analysen zum Tragverhalten von Kavernen im Salinargebirge vor dem Hintergrund der Energieträgerspeicherung und der Abfallentsorgung: ein Beitrag zur Analyse von Gefügeschädigungsprozessen und Abdichtungsfunktion des Salinargebirges im Umfeld untertägiger Hohlräume*. 1. Aufl. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger-Verlag, 2014
- [Wolters u. a. 2009] Wolters, Ralf; Düsterloh, Uwe; Lux, Karl-Heinz; Technische Universität Clausthal, Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik (Hrsg.): *Weiterentwicklung der EDV-Software INFIL zur Simulation des druckgetriebenen Infiltrationsprozesses von Fluiden in ein nicht permeables Barrieren-Gebirge (Salinar)*. Clausthal-Zellerfeld, 2009 – Abschlussbericht – 241 S.
- [Zhao 2017] Zhao, Juan: *Multiphysikalische Prozess- und Systemanalyse für geologische Tiefenlager im Tonsteingebirge in der Nachverschlussphase*. Clausthal-Zellerfeld, Dissertation, 2017

5.6 Vertikalprojekt 6 – Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit

5.6.1 Zielsetzung und Anpassungen

Im Rahmen der Diskussionen über die Endlagerung radioaktiver Reststoffe wurde in den letzten Jahren, nicht nur durch die Vorkommnisse in der Asse, die Möglichkeit einer Rückholung der eingelagerten Abfälle thematisiert. Es zeigte sich, dass mit dieser Option eine höhere Flexibilität im Endlagerprozess und auch eine höhere Akzeptabilität in der Gesellschaft erreicht werden könnten.

Die sich aus dieser Option ergebenden technischen Konsequenzen sind allerdings noch forschungsrelevant. Das Ziel des Vertikalprojekts 6 (VP 6) war es daher, die Entsorgungsoption der Einlagerung radioaktiver Reststoffe in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrung zur Überwachung (Monitoring) und Rückholbarkeit zu untersuchen und Bewertungsgrundlagen für diese Option zu entwickeln. Hierbei ist der Konfliktstrom zwischen dem Erhalt einer ausreichenden Integrität der Barrieren und der leichten Zugänglichkeit zu den radioaktiven Abfällen besonders zu berücksichtigen. In diesem Kapitel wird die ENTRIA-Option „Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit“ kurz als „Tiefenlagerung“ bezeichnet.

Auf Grundlage nationaler und internationaler Endlagerkonzepte wurde die Rückholoption in unterschiedlichen Wirtsgesteinen und Teufen unter den Prämissen der Langzeitsicherheit und der sicheren Zugänglichkeit der Abfälle untersucht. Durch die vielen denkbaren Varianten der Auslegung eines Tiefenlagers ergibt sich eine mehrdimensionale Abhängigkeitsmatrix, die für die vergleichende Betrachtung unterschiedlicher Wirtsgesteine durch ein generisches Tiefenlagermodell vereinfacht wurde. Die Arbeiten in diesem VP enden mit der Entscheidung für oder gegen die Rückholung bzw. den endgültigen Verschluss, die konkrete technische Umsetzung der Rückholung ist nicht mehr Gegenstand der Untersuchungen.

Das VP 6 gliederte sich in der Antragstellung in sieben Arbeitspakete (AP). Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik (IGB-TUBS) hat sich mit vier AP, das Institut für Werkstoffkunde (IW-LUH) mit zwei AP sowie das Institut für Endlagerforschung (IELF-TUC), einschl. des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik (LfDG-TUC), mit einem Arbeitspaket beteiligt. Diese AP waren wie folgt definiert.

- AP 6.1 „Geotechnische Bewertung von Endlagerkonzepten mit der Option zur Rückholbarkeit“ (IGB-TUBS)
- AP 6.2 „Monitoringbasiertes Life-Cycle-Engineering“ (IGB-TUBS)
- AP 6.3 „Risikoanalytische Bewertung geotechnischer Schutzsysteme“ (IGB-TUBS)
- AP 6.4 „Untersuchung der Interaktion der geotechnischen Erfordernisse des Life-Cycle-Engineerings und der risikoanalytischen Betrachtung von Tiefenlagern mit der Option zur Rückholbarkeit“ (IGB-TUBS)
- AP 6.5 „Wechselwirkungen zwischen Endlager, Lagerungssystem und Reststoffen zur Beurteilung von Langzeitstabilität und Rückholbarkeit“ (IW-LUH)
- AP 6.6 „Interventionstechniken zur sicheren Rückholbarkeit“ (IW-LUH)
- AP 6.7 „In-situ-Datenerhebung und Demonstration in der Überwachungsphase eines Tiefenlagers“ (IfAD-TUC)

Im Rahmen der Bearbeitung der AP 6.1 bis 6.4 hat sich gezeigt, dass die vorgesehene Trennung der Inhalte der AP strukturell nicht sinnvoll war. Dies zeigt sich nicht nur in den AP selbst, sondern auch in der Interaktion mit anderen Projektpartnern. Die beschriebenen Inhalte der AP wurden aber, wenn auch in anderer Reihung, bearbeitet. In Anlehnung an die Struktur des AP 6.1 wurden Endlagerkonzepte mit der Möglichkeit der Rückholung geologisch und geotechnisch bewertet und basierend auf dem internationalen Forschungsstand die geotechnischen und geomechanischen Fragestellungen bezüglich der Rückholbarkeit bearbeitet. Dabei wurden die in Deutschland vorhandenen Wirtsgesteine Steinsalz (steil und flach gelagert), Ton, Tonstein und kristallines Hartgestein berücksichtigt und wirtsgesteinsspezifische Konzepte erstellt.

Weiterhin wurde das monitoringbasierte Life-Cycle-Engineering geotechnischer Schutzsysteme, z. B. Ausbau oder Widerlager, in Tiefenlagern mit Rückholbarkeit untersucht. Dabei ist in den derzeit entwickelten und diskutierten Monitoring-Konzepten (z. B. MoDeRn, (MoDeRn, 2013)) die Notwendigkeit einer systematischen Ableitung der zu beobachtenden Zustandsänderungen bzw. der diese Änderungen beschreibenden Parameter u. a. aus dem Sicherheitskonzept und dem Sicherheitsnachweis hervorgehoben worden. Darüber hinaus sind entsprechend AP 6.3 geotechnische Schutzsysteme in Tiefenlagern mit der Option der Rückholung untersucht und bewertet worden.

Aufbauend auf die Ergebnisse der o. g. Untersuchungen wurden in Anlehnung an die Struktur des AP 6.2 Konzepte für Monitoringprogramme der entwickelten Tiefenlagermodelle unter Berücksichtigung des Betrachtungszeitraums entwickelt. Anschließend wurde die Interaktion der geotechnischen Erfordernisse des Life-Cycle-Engineerings und der risikoanalytischen Betrachtung von Tiefenlagern mit Rückholbarkeit aufbauend auf den Ergebnissen der obengenannten Arbeiten untersucht, wie es im AP 6.4 geplant war. Eine detaillierte Beschreibung der Untersuchungen und deren Ergebnisse finden sich in den Forschungsberichten „Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung“, „Normalszenarien und Monitoringkonzepte für Tiefenlager mit der Option Rückholung“ und „Auswirkung der Rückholbarkeit auf die Auslegung von Tiefenlagern hochradioaktiver Reststoffe“, von denen sich zwei noch in der Fertigstellung befinden.

Der Fokus der AP 6.5 und 6.6 lag auf der technischen Barriere des Tiefenlagersystems. Die technische Barriere stellt die innerste Barrierschicht im Tiefenlager dar und umfasst den Behälter mit dem Inventar. In AP 6.5 wurden die am Behältersystem auftretenden Wechselwirkungen für unterschiedliche Tiefenlageroptionen in Abhängigkeit der spezifischen Randbedingungen betrachtet. Hieraus wurden unter besonderer Berücksichtigung werkstofftechnischer Aspekte Konzepte zum Monitoring der technischen Barriere für unterschiedliche Tiefenlageroptionen abgeleitet. Dieses Monitoring dient der Erfassung des Einflusses der Wechselwirkungen zwischen dem Lagerbehältersystem und der Endlagerumgebung auf die technische Barriere und ermöglicht Rückschlüsse auf deren Entwicklung. Die Betrachtung internationaler Konzepte zur Tiefenlagerung ergab, dass die relevanten Eigenschaften für ein Behältermonitoring mit dem Ziel der Rückholbarkeit zu einem großen Teil von der Gestaltung der Tiefenlagerbehälter abhängen. Zudem resultieren aus dem Versatz der Einlagerungsstrecken große Herausforderungen für die Anwendung von Monitoringkonzepten an der innersten Barrierschicht. Diese bestand darin, den hermetischen Verschluss mit einer Energie- und Datenübertragung der Sensorsysteme zu vereinbaren. Dieser Einschränkung musste demnach verstärkt Rechnung getragen werden.

Das AP 6.6 befasste sich mit der Definition von Randbedingungen einer sicheren Rückholbarkeit der Abfallgebinde aus dem Tiefenlager und hiermit einhergehend mit der Entwicklung von technischen Konzepten zur Freilegung, Handhabung und dem Transport der rückzuholenden Behälter. Hierzu wurden zu Projektbeginn internationale Konzepte zur Handhabung und Freilegung von Behältern recherchiert. Es zeigte sich, dass sich die Grundvoraussetzungen und Randbedingungen der Rückho-

lung bei den einzelnen Entsorgungsoptionen stark voneinander unterscheiden. Auch die Aspekte der Handhabung im Rahmen der Einlagerung und Rückholung bei der Tiefenlagerung unterscheiden sich zwischen verschiedenen Konzepten stark und werden zu einem erheblichen Teil von der Gestaltung der Lagerbehälter beeinflusst. Es wurden daher zunächst die optionsspezifischen Randbedingungen der technischen Handhabungskonzepte definiert. Erst auf dieser Grundlage war es möglich ein Rückholkonzept für die unterschiedlichen Endlagerumgebungen zu entwickeln, welches nach dem heutigen Stand der Technik realisierbar und sicher durchführbar ist. Um dies zu ermöglichen, musste der Lagerbehälter, der selber eine zentrale Komponente der Auslegung des Tiefenlagers darstellt, als integraler Bestandteil des Rückholkonzeptes betrachtet werden.

Im AP 6.7 waren ursprünglich Arbeiten zu den in-situ-Datenerhebungen und zur Demonstration sicherheitsrelevanter Phänomene in der Überwachungsphase eines Tiefenlagers vorgesehen. Während der Bearbeitung der Vertikalprojekte 5 und 6 (VP 5 und VP 6) hat sich allerdings insofern Änderungsbedarf ergeben, als dass im VP 6 für das Tiefenlager mit Überwachung und Rückholbarkeit eine zweisöhlige Konfiguration erforderlich wurde, wie sie für ein Endlager ohne Rückholoption nicht notwendig ist. Das untersuchte Tiefenlager besteht aus einer Einlagerungssohle und einer zusätzlichen Überfahrungssohle sowie Verbindungsbohrlöchern zum längerfristigen, unmittelbaren Monitoring auch noch nach Ende des Einlagerungsbetriebs. Nach der Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager ist im Rahmen der langzeitsicherheitsbezogenen Analysen diesem 2-Sohlen-Konzept Rechnung zu tragen. Diese waren im Rahmen der Antragstellung jedoch nicht vorgesehen. Gegenstand von AP 6.7mod ist daher nunmehr die Analyse der Entwicklungen des neu konfigurierten zweisöhligen Endlagerbergwerks nach dem Verschluss der Einlagerungssohle sowie auch der Überwachungssohle nach Ende der Monitoringphase.

Im Folgenden werden die Untersuchungen und deren Ergebnisse in der Reihenfolge der bearbeitenden Institutionen aufgeführt.

5.6.2 Institut für Grundbau und Bodenmechanik (TUBS)

Stand der Technik im Kontext der bearbeiteten Inhalte

In den Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) wurde erstmals eine Rückholbarkeit der eingelagerten hoch radioaktiven Reststoffe (HAW) in Deutschland vorgegeben. Zusätzlich wurde festgelegt, dass die Maßnah-

men zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen dürfen. In Deutschland wurde bisher das wartungsfreie Endlager mit unmittelbarem Verschluss nach Einlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit favorisiert. Nachdem eine Einlagerung hoch radioaktiver Abfälle im Salzstock Gorleben politisch nicht durchsetzbar war, wurde 2013 durch das Standortauswahlgesetz (StandAG) ein neuer Suchprozess für einen Endlagerstandort in Deutschland initiiert.

Im Zuge des Standortauswahlverfahrens ist jeder potentiell geeignete Standort und damit unterschiedliche Wirtsgesteine zu betrachten, um einen Standort mit der „bestmöglichen Sicherheit“ zu finden. Hierbei sind Tongestein, kristallines Hartgestein sowie Steinsalz zu berücksichtigen. Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens wurde die Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ eingesetzt, welche die „Endlagerung mit Reversibilität“ als Entsorgungspfad für Deutschland empfiehlt (Endlagerkommission, 2016, S. 31). Konkret erfordert dies geplante Maßnahmen zur Rückholung, die sich auf die Betriebsphase und ggf. eine zusätzliche Beobachtungsphase vor dem Verschluss des Endlagerbergwerks beziehen. Nach der Einlagerungsphase müssen hierfür Teile des Bergwerks funktionsfähig und zugänglich bleiben. Darüber hinaus ist die Beobachtung der weiteren Entwicklung des Bergwerks durch Nahfeldmonitoring erforderlich. Die Ziele des Monitorings sollen möglichst früh im Entsorgungsprojekt festgelegt werden (Endlagerkommission, 2016). Nach dem Verschluss des Tiefenlagers, d. h. der Überführung in ein Endlager, kann die Reversibilität der Entscheidungen durch eine Bergung der Abfälle umgesetzt werden. Der Nachweis dieser Möglichkeit wurde auf 500 Jahre begrenzt, siehe hierzu BMU (2010).

Rückholbarkeit wird international diskutiert und ist teilweise in nationale Projekte eingeflossen. So wurden in (International Atomic Energy Agency, 2009) die technischen Folgerungen aus der Berücksichtigung einer Rückholbarkeit in den unterschiedlichen, nationalen Kontexten reflektiert und die daraus folgenden positiven sowie negativen Aspekte für die Langzeitsicherheit und die Akzeptabilität dargestellt. Dennoch existiert bisher noch kein betriebsbereites Tiefenlager, das die Möglichkeit einer Rückholung auch über die Einlagerungsphase hinaus berücksichtigt.

Die Rückholbarkeit als Möglichkeit zur Fehlerkorrektur erfordert zur Detektion der Fehler Vorkehrungen zur Überwachung (Monitoring) des Tiefenlagers. Für ein Tiefenlagerprojekt mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit ist aus technischer Sicht aufgrund der erforderlichen Entscheidungsgrundlage die Beobachtung der Zustandsänderungen im System durch ein Monitoring erforderlich. Bei planmäßiger Entwicklung schließt

sich an die Beobachtungsphase die Überführung des Tiefenlagers in ein Endlager an. Das Monitoring ermöglicht die Erfassung und Bewertung der Zustandsänderungen im Tiefenlager. Der zusätzliche Offenhaltungszeitraum und das Monitoring im Nahfeldbereich erhöhen allerdings das technische Risiko des Tiefenlagers insbesondere durch die Degradation der Integrität der Barrieren, siehe dazu auch Stahlmann u. a. (2015). Somit ist an dieser Stelle aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht für eine längerfristige Beobachtungsphase eine Anpassung der Sicherheitsanforderungen notwendig. Einerseits ist die Beobachtungsphase selbst zu berücksichtigen und andererseits ist zu klären, inwieweit sie die passive Sicherheit des Tiefenlagersystems beeinflusst, bzw. beeinflussen darf.

Im Bereich Monitoring eines geologischen Tiefenlagers wurde auf europäischer Ebene ein „Monitoring Reference Framework“ erstellt. Hier wurden die möglichen Ziele eines Monitorings und die damit verbundenen Entscheidungen diskutiert. Es wurde ein Workflow entwickelt, anhand dessen sich nationale Entsorgungsorganisationen die erforderlichen Parameter und Techniken für ein konkretes Monitoringprogramm erarbeiten können (MoDeRn, 2013). Über ein ähnliches Vorgehen wurden auch für den vorliegenden Bericht die Parameter bestimmt, die für eine gebirgsmechanische Begleitung eines Tiefenlagerprogramms erforderlich sind.

Der Stand der Technik zum Zeitpunkt der Planung des Tiefenlagers ist für seine Auslegung maßgebend und zu beachten. Auf dieser Grundlage ist auch das Monitoringkonzept des Tiefenlagers auf dem aktuellen Stand der Technik zu planen. Die auf dem Markt vorhandene Messtechnik weist zurzeit drei Schwachstellen hinsichtlich der Dauer des Beobachtungszeitraums auf: die Datenübertragung, die Stromversorgung und die Zuverlässigkeit. Die Datenübertragung und die Stromversorgung sollen autark ohne Beeinträchtigung der Barrieren und über die gesamte Offenhaltungsphase funktionieren. Im Prinzip wurde bereits belegt, dass auch eine Übertragung von Daten durch das Gebirge möglich ist (MoDeRn, 2013). Allerdings gehört diese Technik noch nicht zum Stand der Technik. Für die Stromversorgung bieten sich zurzeit Radionuklid- und Beta-Voltaik-Batterien an. Beta-Voltaik-Batterien werden im Weltraumprogramm der NASA für Raumsonden verwendet. Die Lebensdauer der o. g. Batterien ist allerdings auf einige Jahrzehnte begrenzt und sie sind noch nicht auf dem freien Markt verfügbar. Der Nachweis einer über Jahrzehnte andauernden Zuverlässigkeit von Messsystemen kann bisher nicht erbracht werden. Damit ergibt sich die Notwendigkeit einer wartbaren Messkette, die auch die Zugänglichkeit zu den Messgebern erfordert. Damit treten eine autarke Stromversorgung und eine kabellose Datenübertragung in den Hintergrund.

Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit – Begriffsdefinitionen

Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit finden in unterschiedlichen Phasen des Entsorgungsprojekts statt und unterscheiden sich daher grundsätzlich. Im Kapitel 3.2 wurden die technischen und naturwissenschaftlichen Grundannahmen zu einer Analyse der Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Reststoffe dargestellt und der Lebenszyklus eines Tiefenlagers in der Abbildung 3.2 verdeutlicht.

Dieser Lebenszyklus beginnt mit der Vorbetriebsphase, in der das Auswahlverfahren für einen geeigneten Standort stattfindet. Darauf folgt das Genehmigungsverfahren. Nach Erteilung der Genehmigungen beginnt die Betriebsphase mit der Errichtung des Tiefenlagers. Dafür werden zunächst die Oberflächenanlagen errichtet, anschließend die Zugänge nach unten unter Tage abgeteuft und schließlich die Infrastruktur des Grubengebäudes aufgeföhren. Ab diesem Zeitpunkt kann mit der Einlagerung begonnen werden, indem die jeweilige Einlagerungsstrecke aufgeföhren, die Behälter in ihr platziert und sie anschließend ohne weitere Verzögerungen wieder verschlossen wird. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass eine Bohrlochlagerung nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen war. Ist der Prozess für alle einzulagernden Reststoffe abgeschlossen, endet die Betriebsphase. Die Nachbetriebsphase stellt den wesentlichen Unterschied eines Tiefenlagers mit Rückholbarkeit im Vergleich zu einem wartungsfreien Endlager dar: In einem Tiefenlager wird die untertägige Infrastruktur nach Verschluss der Einlagerungsstrecken für eine weitere Überwachung und für eine schnelle Zugänglichkeit der Abfälle offengehalten. Die Dauer der Offenhaltung ist aus der technischen Perspektive auf Grundlage einer ausreichenden Barrierenintegrität, welche die Langzeitsicherheit gewährleistet, zu bestimmen. Entwickelt sich das Tiefenlager planmäßig und stehen keine gesellschaftlichen Bedürfnisse dagegen, kann das Tiefenlager in ein Endlager überführt werden. Das restliche Grubengebäude wird verschlossen. Nun schließt sich die wartungsfreie Endlagerungsphase an, in der bis auf den Erhalt der Information über das Tiefenlager keine weiteren Maßnahmen vorgesehen sind. Anhand des beschriebenen Lebenszyklus werden im Folgenden Reversibilität, Rückholbarkeit und Bergbarkeit definiert, siehe dazu auch Stahlmann u. a. (2015).

Reversibilität ist die Möglichkeit, Entscheidungen zurückzunehmen. Sie ist prinzipiell von der Vorbetriebsphase bis zur Nachbetriebsphase gegeben. Die Umsetzung der Reversibilität wird allerdings aufwändiger, je weiter das Projekt vorangeschritten ist.

Der Begriff Rückholbarkeit beschreibt die Möglichkeit, die eingelagerten Reststoffe auf eine zuvor geplante Art und Weise wieder zurückzu-

holen. Daraus ergibt sich das Erfordernis einer technischen Infrastruktur und, wenn Rückholbarkeit zur Fehlerkorrektur dient, einer Beobachtung. Eine Rückholung ist die konkrete Umsetzung der Rückführung der Abfälle an die Geländeoberfläche (vgl. Abbildung 5.77). Bergbarkeit ist hingegen

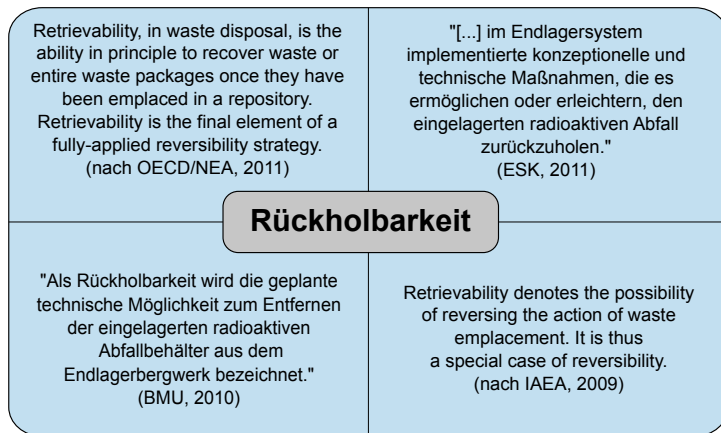


Abbildung 5.77: Ausgewählte Definitionen der Rückholbarkeit von unterschiedlichen Institutionen.

als Möglichkeit der Rückführung der Reststoffe nach Verschluss des Bergwerks definiert. Aus ihr resultieren Anforderungen an die mechanische Integrität des Behälters, die 500 Jahre gegeben sein muss (BMU, 2010). Eine Bergung ist die konkrete Umsetzung der Rückführung der Abfälle, welche bergmännische Maßnahmen (Aufwältigung, Neuauffahrung, etc.) erforderlich machen.

Gründe und Kriterien für eine Rückholung aus geotechnischer Sicht

Die Tiefenlagerung hoch radioaktiver Reststoffe hat zwei Hauptziele: Sicherstellung einer langfristigen Isolation der Radionuklide von der Biosphäre und die Gewährleistung einer leichten Rückholung der eingelagerten Reststoffe.

Mögliche Gründe für eine Rückholung sind in Abbildung 5.78 aufgeführt. Aus geotechnischer Sicht sind dies insbesondere die Degradation der geologischen und geotechnischen Barrieren. Hinzu kommen die Entwicklung der hohlraumnahen Auflockerungszonen (ALZ), die nach dem Zutritt von Wässern oder Lösungen aufgrund ihrer erhöhten Permeabilität zu einer Migration von Radionukliden führen können. Darüber hinaus

sind bei zeitlich veränderlichen Wirtsgesteinseigenschaften Verluste der Standsicherheit und auch unerwartete Wasserzutritte zu erwarten. Hieraus leiten sich die Kriterien für eine geotechnisch fundierte Entscheidung ab. Die Kriterien lassen sich in dem Nachweis der Integrität der Barrieren zusammenfassen. Kann dieser erfolgreich geführt werden, so ist die Überführung in ein Endlager zu empfehlen. Ist dieser Nachweis nicht mehr möglich, ist die Rückholung erforderlich. Näheres hierzu findet sich im Arbeitsbericht „Gebirgsmechanische Untersuchungen der Konsequenzen der Option Rückholung“. Über die geotechnischen Gründe für eine Rückholung hinaus, sind ebenfalls Gründe aus der Behälterintegrität und vor allem Gründe aus gesellschaftlichen Bedürfnissen zu beachten.

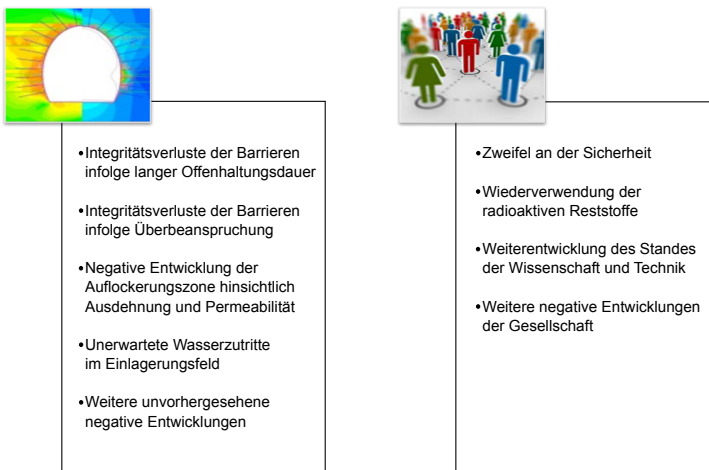


Abbildung 5.78: Mögliche Gründe für eine Rückholung aus geotechnischer und gesellschaftlicher Perspektive.

Design eines Tiefenlagermodells unter Berücksichtigung der Rückholbarkeit

Grundlegendes. Unter der Berücksichtigung mehrerer möglicher Wirtsgesteine ergibt sich bei der Konzeption eines Tiefenlagers eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten⁷⁰. Um eine Vergleichbarkeit der Konzepte für unterschiedliche Wirtsgesteine zu erreichen, wurde es erforderlich,

⁷⁰Z. B. Wirtsgestein, Verfüllung, Art des Zugangs (Schächte / Rampe), Art der Einlagerung (Bohrlochlagerung / Streckenlagerung), Grad der Verfüllung bzw. der Offenhaltung

die Untersuchung auf ein generisches Modell zu beschränken. Weiterhin ist eine Vielzahl möglicher Szenarien für eine Rückholung denkbar. Der Fokus wird hier auf die gebirgsmechanischen Prozesse, welche die Integrität der geotechnischen und geologischen Barrieren beeinflussen können, gelegt.

Das generische Tiefenlagermodell wird in seinen wesentlichen Zügen im Kapitel 3.2 des interdisziplinären Teils dieses Abschlussberichts erläutert und ist dort in der Abbildung 3.3 dargestellt. Es besteht aus einem zweisöhligen Grubengebäude mit offengehaltenem Infrastrukturbereich (den Zugangsstrecken, Werkstätten und Monitoringstrecken) sowie den direkt nach der Einlagerung der radioaktiven Reststoffe verschlossenen Einlagerungstrecken. Die Einlagerungstrecken werden mit jeweils sechs ENCON-Behältern, welche die Maße eines POLLUX®-Behälters aufweisen, bestückt. Dabei beträgt der Abstand der Behälter zueinander eine Behälterlänge. Zur Wahrung der Isolation der eingelagerten Reststoffe wird jede Einlagerungstrecke mit einem Verschlussbauwerk verschlossen. Dieses übernimmt eine abdichtende und eine mechanische Funktion und soll die Integrität des Versatzes und des Wirtsgesteins sichern (siehe dazu auch Stahlmann u. a. (2014, 2016)).

Erfordernisse und Rahmenbedingungen der Rückholbarkeit in unterschiedlichen Wirtsgesteinen. Für das deutsche Entsorgungskonzept kommen wie oben bereits aufgeführt vier potentielle Wirtsgesteinstypen infrage: Steinsalz, Ton, Tonstein und kristallines Hartgestein. Für Steinsalz ist zwischen Steinsalz in flacher und in steiler Lagerung zu unterscheiden (siehe hierzu Missal u. a. (2014)). Jedes potentielle Wirtsgestein weist Vor- und Nachteile auf. Da kein natürliches Gestein alle Anforderungen an ein ideales Wirtsgestein erfüllt, sind mögliche Gesteinsformationen hinsichtlich ihrer Eignung zu bewerten.

Als geologische Barriere soll das Wirtsgestein den Zutritt von Flüssigkeiten zu den Radionukliden verhindern. Dafür muss es eine möglichst geringe Permeabilität aufweisen. Offene Trennflächen wirken sich dabei nachteilig aus. Trennflächensysteme entstehen bei der Genese der Gesteine, bei Tonsteinen im Wesentlichen durch die diagenetische Einregelung der Tonminerale, bei kristallinem Hartgestein durch die Abkühlung in ihrer geologischen Vergangenheit. Je ausgeprägter und vernetzter die Trennflächen im Wirtsgestein sind, desto höher ist die Permeabilität des Gebirges. Im Fall eines Zutritts von Flüssigkeiten und der Freisetzung von Radionukliden, sollte das Wirtsgestein idealerweise über eine Sorptionsfähigkeit verfügen. Darüber hinaus sollte Gasdruck vom Wirtsgestein auf-

genommen werden können, ohne dass dadurch durchgängige Wegsamkeiten entstehen.

Die Rückholbarkeit stellt eine weitere Anforderung an die mechanische Stabilität des Wirtsgesteins dar. Für die Gewährleistung der Rückholung und das Monitoring ist eine langfristige Offenhaltung der Hohlräume erforderlich. Der Nahbereich der Hohlräume sollte möglichst einfach zu sichern sein und über den Zeitraum, in der eine Rückholbarkeit vorgesehen ist, keine wesentlichen Degradationserscheinungen aufweisen.

Jede Auffahrung von Hohlräumen in einem Gebirge bedingt eine Störung des Spannungszustands, die zu Verzerrungen führt. An der Hohlraumwandung treten Verschiebungen auf. In Abhängigkeit von den Festigkeitseigenschaften des Gebirges, d. h. der Gebirgstragfähigkeit, entwickeln sich bei Überschreitung der Bruchverzerrungen sogenannte plastische Zonen im Gebirge. Im hohlraumnahen Bereich werden sie als Auflockerungszonen (ALZ) bezeichnet. Diese Mechanismen können, wie Abbildung 5.79 darstellt, bis zum Verbruch des Hohlraums führen. Infolge der entstehenden Auflockerung erhöht sich in diesen Zonen im Vergleich zum intakten Gebirge die Permeabilität. Durch die Sicherung der Hohlräume, beispielsweise mit Spritzbeton, wird die Entwicklung der plastischen Zonen reduziert. Durch diese Sicherung oder eine hohe Festigkeit des Gebirges bildet sich ein sogenannter Gebirgstragring aus, d. h. das Gebirge trägt die Spannungen mit ab. Durch die Degradation der Ausbausicherung und / oder ein zeitabhängiges Verhalten des Gebirges kann es zu einer Auflösung des Gebirgstragrings kommen, sodass sich die plastischen Zonen weiter in das Gebirge entwickeln. Dies führt zu einer abnehmenden Integrität der geologischen Barriere. Weiterhin ist die Gebirgstragfähig-

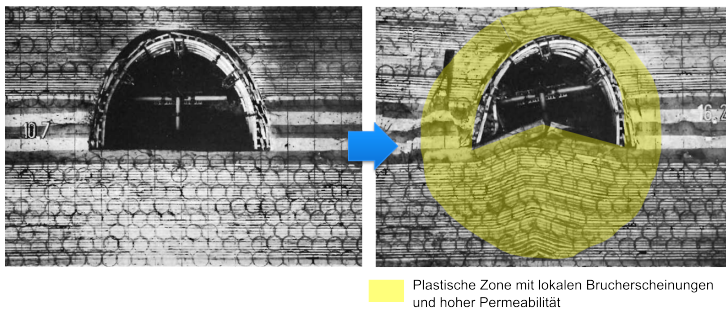


Abbildung 5.79: Gebirgstragverhalten nach Bildern von Modellversuchen aus (Jacobi, 1981).

keit, d. h. der Bedarf eines Ausbauwiderstandes über kürzere Standzeiten,

für die betrachteten Wirtsgesteine sehr unterschiedlich. Besonders plastische Gesteine erfordern einen kurzfristigen Ausbauwiderstand, während kristalline Hartgesteine, auch über die gesamte Dauer der Rückholopti-on, nur mit einem geringen Ausbauwiderstand auskommen. In Abbildung 5.80 sind die Zusammenhänge schematisch dargestellt. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen möglichen Wirtsgesteine in ihren Eigenschaften kurz beschrieben.

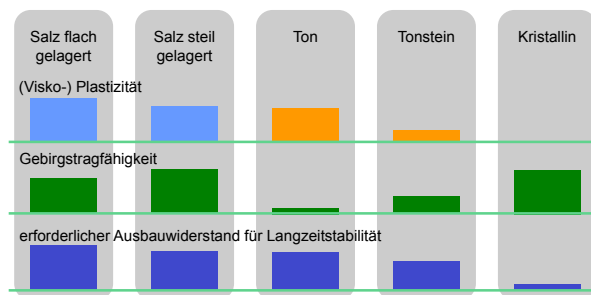


Abbildung 5.80: Vergleich der relevanten Eigenschaften verschiedener Wirtsgesteine bei einer längerer Offenhaltung aufgrund der Anforderung Rückholbarkeit.

Infolge der Viskoplastizität im Steinsalz wird der Gebirgstragring über die Zeit abgebaut, so dass es ohne Ausbausicherung zu Konvergenzen bis hin zu einem Verbruch kommt. Eine Ausbausicherung würde über die gesamte Offenhaltungszeit durch den vollen lithostatischen Druck beansprucht werden. Im Steinsalz tritt ohne Ausbau langfristig eine Schwächung der Integrität der Wirtsgesteinsbarriere ein. Das intakte Wirtsgestein zeigt allerdings eine sehr gute hydraulische Wirkung der Barriere, da Steinsalz aufgrund seiner Viskoplastizität über kein hydraulisch wirksames Trennflächensystem verfügt.

Auch Ton weist ein zeitlich veränderliches Kriechverhalten auf. Weiterhin besitzt er eine große Plastizität und Quellfähigkeit. Im Vergleich zu Steinsalz hat Ton eine geringere Kurzzeitfestigkeit, welche zu einem hohen Aufwand in der Hohlraumsicherung führt. Ton besitzt aufgrund seiner Quellfähigkeit ebenfalls kein hydraulisch wirksames Trennflächensystem. Die Permeabilität ist sehr gering, daher hat Ton eine gute hydraulische Barrierewirkung.

Tonstein hat eine höhere Eigentragfähigkeit aber eine geringere Plastizität als Ton. In Abhängigkeit von der Druckhaftigkeit des Tonsteins bildet sich um die Hohlräume ein Gebirgstragring aus. Je geringer die

Druckhaftigkeit ist, desto geringer ist der Aufwand zur Hohlraumsicherung. Durch seinen Verfestigungsprozess entsteht im Tonstein ein Trennflächensystem, das im Vergleich zu Ton und Steinsalz zu einer höheren Permeabilität führt. Die Permeabilität ist dennoch insgesamt gering.

Gegenüber den anderen Wirtsgesteinen zeichnet sich kristallines Hartgestein durch eine hohe Festigkeit und ein fehlendes plastisches Verhalten aus. Daher ist von einem Erhalt des Gebirgstragrings und von geringeren erforderlichen Ausbauwiderständen auszugehen. Dem Wirtsgestein kann aufgrund des vorhandenen Trennflächensystems jedoch keine hydraulische Barrierewirkung zugesprochen werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Gebirge mit einer hohen Festigkeit die Rückholung erleichtern, hier aber andere für die Endlagerung negative Eigenschaften bzgl. der Permeabilität zu berücksichtigen sind. Kriechfähige Gebirge hingegen erschweren die Rückholung, für die Endlagerung besitzen sie jedoch positive Eigenschaften.

Geforderte Mindestteufen der Einlagerungssohle. Die Teufenlage der Einlagerungssohle bei der Entsorgung der Reststoffe in tiefen geologischen Formationen ist für den Schutz der Biosphäre entscheidend. Zum einen bestimmt sie hauptsächlich den Primärspannungszustand, zum anderen soll sie eine ausreichende Isolation der radioaktiven Reststoffe von der Biosphäre garantieren. Im Zeitraum der Lagerung der Reststoffe werden mit hoher Wahrscheinlichkeit mehrere Eiszeiten in Perioden von ca. 100.000 Jahren auftreten. Innerhalb einer Eiszeit gibt es mehrere Gletschervorstöße, die damit verbundenen Prozesse besitzen eine große Erosionskraft. Infolgedessen entstehen glazigene Rinnensysteme, die nach der Eiszeit wieder mit Fluss- oder Stausedimenten verfüllt werden. Bei Lockersedimenten, wie im Norddeutschen Becken, ist die Erosionskraft eines Gletschers deutlich größer als auf einem Hartgesteinsuntergrund. Das Norddeutsche Becken wurde z. B. durch glaziale Rinnenbildung umgeformt. Diese Rinnen können bis zu 500 m tief sein. Das ein Tiefenlager aufnehmende Wirtsgestein muss daher eine ausreichende Teufenlage aufweisen, um die oben genannten Einwirkungen von den Reststoffen fernzuhalten. Die generischen Modelle berücksichtigen die zu erwartenden Veränderungen in dem vom BMU (2010) festgelegten Nachweiszeitraum von über einer Million Jahre. Ein Tiefenlager sollte daher in Teufen von mindestens 600 m angelegt werden.

Je tiefer die Einlagerungssohle liegt, desto größer wird besonders bei plastischen und kriechfähigen Wirtsgesteinen der Aufwand zur Gewährleistung der Rückholung. Der Grad der Zerklüftung und damit die Permeabilität verhalten sich umgekehrt proportional zur Tiefe, d. h. mit zuneh-

mender Teufe sinkt der Grad der Zerklüftung. Er geht dabei nicht vollständig zurück, sodass Klüfte auch in großen Teufen vorzufinden sind. Abbildung 5.81 stellt die Teufenlage des Tiefenlagers, die Permeabilität des Wirtsgesteins sowie die Merkmale zur Rückholung und Dichtigkeit gegenüber. Die Einlagerungstiefe liegt bei Steinsalz in steiler Lagerung mit 800 m tiefer, da das Aufsteigen des Salzes durch Dichteinversion berücksichtigt werden muss. In kristallinem Hartgestein können aufgrund der Lage in den Mittelgebirgen und ihrer Erosionsresistenz auch geringere Tiefen angestrebt werden, allerdings ermöglichen die guten mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins auch größere Tiefen mit geringem Aufwand. Wegen der geringen Festigkeit von Ton ist eine möglichst geringe Teufenlage des Tiefenlagers anzuraten.

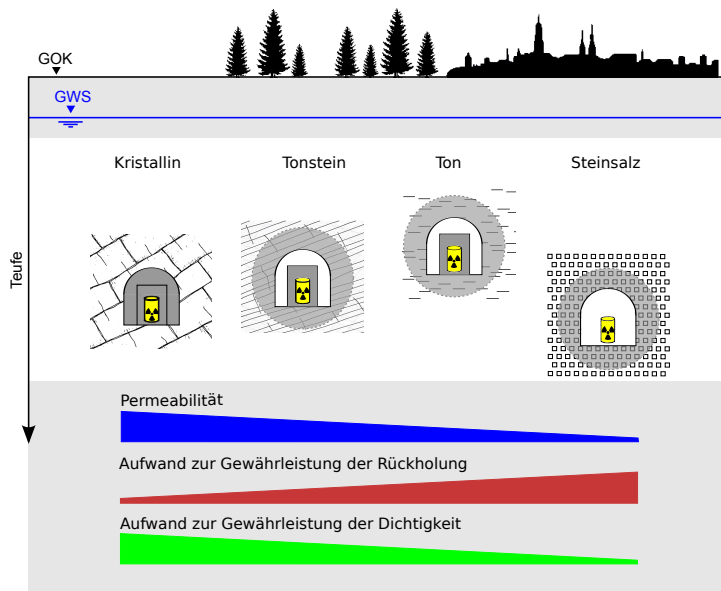


Abbildung 5.81: Gegenüberstellung der Teufenlage des Tiefenlagers, Permeabilität des Wirtsgesteins sowie die Merkmale zur Rückholung und Dichtigkeit.

Anforderungen an die geotechnischen Schutzsysteme. Unterschiedliche Wirtsgesteine erfordern unterschiedliche Materialien für die geotechnischen Barrieren, die mit dem chemischen Milieu des Wirtsgesteins ver-

träglich sein müssen. Diese Barrieren setzen sich aus dem Versatz in den Einlagerungsstrecken und den Verschlussbauwerken zusammen.

Im Steinsalz wurde in den Untersuchungen von einer Verfüllung der Einlagerungsstrecken mit Salzgrus ausgegangen. Salzgrus ist zerkleiner-tes Steinsalz und weist beim Einbringen in den zu verfüllenden Hohlraum zunächst eine hohe Porosität auf. Ein Gegendruck, also Ausbauwider-stand, zum Gebirgsdruck wird deswegen nur langsam mit fortschreiten-der Konvergenz des Gebirges aufgebaut. Nach vollständiger Kompaktion besitzt der Salzgrus vergleichbare Eigenschaften wie das umgebende Steinsalz.

Die Funktionalität des Verschlussbauwerks der Einlagerungsstrecke im Steinsalz umfasst den Schutz des im Tiefenlager tätigen Personals gegen ionisierende Strahlung, die Behinderung des Zutritts von Lösungen in die Einlagerungsstrecke und die schadlose Aufnahme der Gebirgsspannun-gen. Vor dem Einbau des Verschlussbauwerks wird die Auflockerungszone nachgerissen, um die Umläufigkeit des Bauwerks durch die Auflocke-rungszone zu reduzieren (vgl. Abbildung 5.82). Da eine vollständige Ent-fernung der Auflockerungszone nicht möglich ist, wird eine weitere Ab-dichtung erst infolge des Aufkriechens des Salzgesteins auf das Bauwerk erfolgen. Hierzu muss das Bauwerk eine ausreichende Steifigkeit besit-zen. Als Material wurde in den Untersuchungen ein Salzbeton angenom-men, der diese Anforderung erfüllt. Es ist allerdings noch offen, ob Salzbe-ton ausreichend korrosionsbeständig gegen Lösungen mit MgCl_2 -Antei-len ist. Alternativ wäre ein MgO -Beton zu untersuchen, der jedoch nicht korrosionsbeständig gegen reine NaCl -Lösung ist.

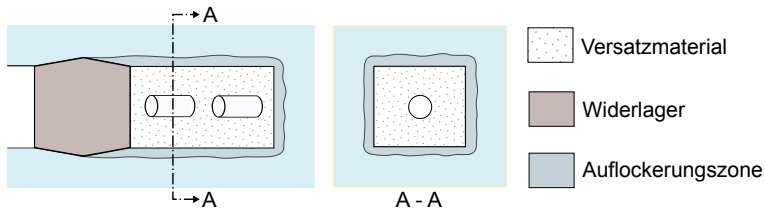


Abbildung 5.82: Schematische Darstellung eines Verschlussbauwerks in einer Strecke im Steinsalz.

Für die anderen Wirtsgesteine wurden in den Untersuchungen Bentonit-basierte Materialien als Streckenversatz angenommen. Bentonit be-steht hauptsächlich aus quellfähigen Tonmineralen, die durch Absorpti-on von Wasser in den Zwischenschichten quellen. Verhindert man diese Volumenvergrößerung durch eine Einspannung, so führt dies zum Aufbau

eines Quelldrucks, der einen Gegendruck, d. h., Ausbauwiderstand zum Gebirge darstellt und vorhandene Resthohlräume verschließen kann. Der Quelldruck ist in Längsrichtung der Strecke durch das Verschlussbauwerk aufzunehmen und in das Gebirge einzuleiten (vgl. Abbildung 5.83). Dies stellt eine im Vergleich zum Verschlussbauwerk im Steinsalz zusätzliche Funktionalität dar. Die Interaktion des Widerlagers mit dem Wirtsgestein und dem Abdichtungselement sowie der Verfüllung ist wichtiger Bestandteil für die Beurteilung der gebirgsmechanischen Machbarkeit der Tiefenlagerung.

Inwieweit das Verschlussbauwerk auch abdichtende Funktionen übernehmen kann, ist noch Stand der Forschung, da nicht in jedem Wirtsgestein von einer Verheilung oder Abdichtung der Auflockerungszone ausgegangen werden kann. Als Material für das Bauwerk wurde ein Beton aus niedrig-pH-Zement, einem Spezialzement, der die chemische Alteration im Wirtsgestein reduzieren soll, angenommen. Weiterhin ist die Korrosionsbeständigkeit gegen eindringende Wässer nachzuweisen.

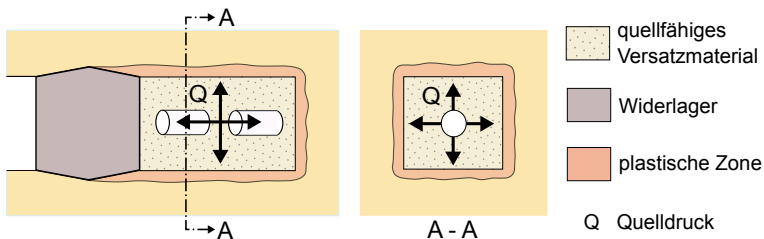


Abbildung 5.83: Schematische Darstellung eines Verschlussbauwerks in einer Strecke im Ton, Tonstein oder kristallinen Hartgestein.

Ermittlung des Flächenbedarfs des Tiefenlagers basierend auf der Wärmeausbreitung. Für die Auslegung eines Tiefenlagers ist die Bestimmung des Flächenbedarfs erforderlich. Ein wichtiger Faktor dafür sind die Temperaturen in den Kontaktzonen Behälter / Versatz und Versatz / Wirtsgestein. Die Temperatur der Behälter ist von ihrer Beladung und der Dauer der Zwischenlagerung der Reststoffe abhängig. Deutsche Forschungen über die Möglichkeit einer Rückholung eingelagerter Behälter kamen zum Schluss, dass im Steinsalz 40 Jahre nach Beginn der Einlagerung damit zu rechnen ist, dass bei zwei Containern die Temperatur unter 100 °C gefallen ist (Engelmann u. Lommerzheim, 1995). In der „Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG)“ wurde die Möglich-

keit der Rückholung in Steinsalz während der Betriebsphase ohne eine Änderung der Behälterbeladung beschrieben (Bollingerfehr u. a., 2012). In diesem Bericht wurde festgestellt, dass die benötigte Abkühlung der Einlagerungsfelder 40 Jahre in Anspruch nehmen würde. Durch eine zusätzliche Kühlung soll ein Rückholungszeitraum von 40 Jahren erreichbar sein. Ziegenhagen u. a. (2005) gelangen in ihrer Arbeit über die Konsequenzen einer Option der Rückholung zum Schluss, dass aufgrund der Rückholmaßnahmen der Flächenbedarf für die Einlagerungssole im Vergleich zu einer wartungsfreien Endlagerung ohne Rückholbarkeit größer ist. Für die Tiefenlagerung in Tonstein wird der Flächenbedarf 1,3-mal größer und in kristallinem Hartgestein oder Steinsalz wird für den Flächenbedarf mehr als das Achtfache angenommen. Die Ergebnisse des Berichtes wurden aufgrund von konzeptionellen Überlegungen erreicht, numerische Methoden wurden nicht angewendet.

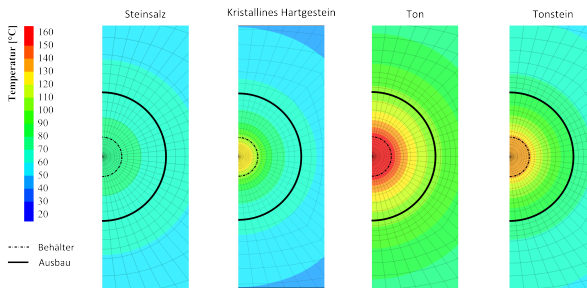


Abbildung 5.84: Wärmeausbreitung eines ENCON-10 in verschiedenen Wirtsgesteinen 10 Jahre nach der Einlagerung.

Nach der derzeitigen Gesetzgebung ist die Temperatur an der Außenfläche der Behälter auf 100° C zu beschränken (StandAG, 2017). Unter Berücksichtigung einer Rückholbarkeit sind wegen des Arbeitsschutzes zusätzlich die sich ergebenden Temperaturen in den offengehaltenen Infrastrukturbereichen zu beachten, siehe hierzu Léon Vargas u. a. (2017). Um die Auswirkung der Rückholbarkeit auf den Flächenbedarf zu ermitteln, wurden basierend auf den generischen Modellen von Stahlmann u. a. (2014) thermische Simulationen mittels FLAC3D durchgeführt. Die Berechnungen erfolgten für generische Tiefenlager in Steinsalz, Ton, Tonstein und kristallinem Hartgestein, wobei die Dauer der Zwischenlagerung, die Beladung und der Abstand zwischen den Behältern variiert wurden. Abbildung 5.84 zeigt die Wärmeausbreitung eines ENCON-Behälters für die verschiedenen Wirtsgesteine 10 Jahre nach seiner Einlagerung. Der Behälter ist mit zehn Uran-DWR-Brennelementen beladen.

Für ein Brennelement wurde ein Abbrand von 50 GWd/tSM und eine Anreicherung von 4% ^{235}U angenommen. Es ist zu erkennen, dass sich in Tiefenlagern mit Bentonit-basiertem Versatz die Wärme im Nahbereich des Behälters aufstaut, da tonige Materialien eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Die Berechnungen für Steinsalz weisen hingegen insgesamt niedrigere Temperaturen auf. Abbildung 5.85 stellt den Tem-

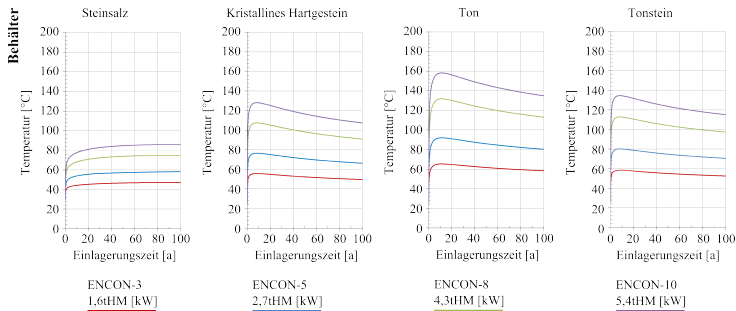


Abbildung 5.85: Zeitabhängiger Temperaturverlauf an der Grenzoberfläche zwischen Behälter und Versatz (Abstand zwischen Einlagerungsstrecken $B = 60$ m, Zwischenlagerungszeit $t_z = 40$ a).

peraturverlauf an der Kontaktfläche zwischen Behälter und Versatz für die verschiedenen Wirtsgesteine und unterschiedliche Behälterbeladungen über die Zeit dar. Für die Modelle wurden ein Abstand von 60 m zwischen den Einlagerungsstrecken und eine Zwischenlagerungszeit der Brennstäbe von 40 Jahren festgelegt.

Im Steinsalz steigen die Temperaturen zunächst langsamer als bei den anderen Wirtsgesteinen an. Die zulässige Grenztemperatur von 100°C wird mit keiner Behälterbeladung überschritten. In den übrigen Wirtsgesteinen wird nach etwa zehn Jahren die maximale Temperatur erreicht. Anschließend klingt sie bis zum Ende des Berechnungszeitraums kontinuierlich ab.

Sowohl im Ton und im Tonstein als auch im kristallinen Hartgestein wird die Grenztemperatur mit Behälterbeladungen von acht und zehn Brennelementen überschritten. Deshalb ist für Tiefenlager mit Bentonit-basierender Verfüllung die Behälterbeladung auf fünf Uran-DWR-Brennelemente zu beschränken.

In den Monitoringstrecken sowie vor dem Abdichtungsbauwerk werden während der Offenhaltungsphase Messungen und Wartungsarbeiten stattfinden. Um die Arbeitssicherheit zu gewährleisten, sind die Tempe-

raturen in diesen Bereichen demzufolge nach KlimaBergV zu beschränken. Je nach Wirtsgestein ist diese Grenze unterschiedlich. Sie liegt für Steinsalz bei 52°C und für die anderen Wirtsgesteine bei 30°C. Analog zu Abbildung 5.85 zeigt Abbildung 5.86 den Temperaturverlauf in den Monitoringstrecken über die Zeit. Im Steinsalz wird die Grenztemperatur bei

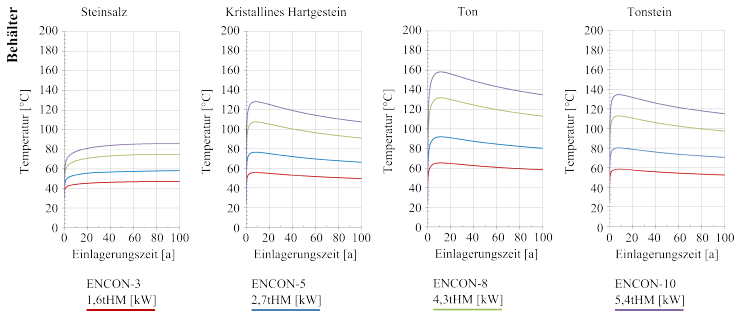


Abbildung 5.86: Zeitabhängiger Temperaturverlauf in den Monitoringstrecken (Abstand zwischen Einlagerungsstrecken $B = 60$ m, Zwischenlagerungszeit $t_z = 40$ a).

Behälterbeladungen von maximal fünf Brennelementen eingehalten. In den übrigen Wirtsgesteinen übersteigt die Temperatur bei allen Behälterbeladungen die zulässige Maximaltemperatur. Daraus lässt sich schließen, dass ein Bewetterungssystem zur Kühlung während der gesamten Offenhaltungsphase sowie ggf. während der Dauer des Rückholprozesses benötigt wird.

Zusammenfassend ergibt sich durch die Rückholbarkeit und damit einhergehende Begrenzung der Behälterbeladung eine größere Einlagerungsfläche. Für ein Tiefenlager in Ton, Tonstein oder kristallinem Hartgestein ist die Einlagerungsfläche durch die Rückholbarkeit im Vergleich zu einem wartungsfreien Endlager doppelt so groß ist. Für ein Tiefenlager in Steinsalz wird eine 1,25-fach größere Einlagerungsfläche benötigt. Die Erhöhung der Zwischenlagerzeit der Brennstäbe von 40 auf 75 Jahre hat die Wärmeausbreitung im System erwartungsgemäß nicht wesentlich beeinflusst. Die Untersuchungen beinhalteten außerdem die Variation des Behälterabstands sowie der Zwischenlagerzeit der Brennelemente. Näheres hierzu ist in den Arbeitsberichten (Stahlmann u. a., 2018; Stahlmann, 2018) zu finden.

Monitoring der geotechnischen und geologischen Barriere

Die allgemeinen und interdisziplinär zu berücksichtigenden Fragestellungen, die sich aus dem Monitoring ergeben, wurden im Kapitel 3.6 vorgestellt. An dieser Stelle werden zunächst die erwartete Normalentwicklung aufgezeigt sowie die spezielleren, gebirgsmechanischen Themen erläutert.

Methodik der Szenarienentwicklung. Ein Szenario ist definiert als eine hypothetische Folge von Ereignissen in der Zukunft. Das Normal-, oder auch Referenzszenario beschreibt die Entwicklung, die mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit auftritt. Das für die Szenarienentwicklung verwendete Vorgehen lehnt methodisch an Brunner-Schwer (1986) sowie Geschka u. Hammer (1990) an und wurde an die Erfordernisse der Tiefenlagerung angepasst. Die Vorgehensweise stellt Abbildung 5.87 dar. Weitere Erläuterungen sind in Stahlmann u. a. (2018) zu finden.

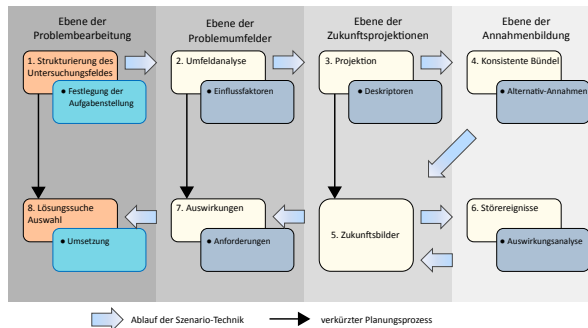


Abbildung 5.87: Vorgehensweise bei der Anwendung der Szenariotechnik (Geschka u. Hammer, 1990).

Die Methodik beginnt mit der Definition und Strukturierung des Untersuchungsfeldes. Hierfür ist eine exakte Aufgabenstellung mit Berücksichtigung der Ziele zu formulieren sowie wichtige Kenngrößen zu ermitteln und in ihrem gegenwärtigen Zustand zu erfassen. Außerdem muss die Dauer des Untersuchungszeitraums eingegrenzt werden. Im nächsten Schritt werden basierend auf einer Umfeldanalyse die Faktoren, die das Untersuchungsfeld hauptsächlich beeinflussen, identifiziert und eingegrenzt. Die Haupteinflussfaktoren werden daraufhin einzelnen Umfeldern des Untersuchungsbereichs zugeordnet.

Es folgt eine Kategorisierung der ermittelten Einflussfaktoren und Kenngrößen in z. B. thermische Einflüsse, hydraulische Einflüsse, etc.

Anschließend sind Entwicklungstendenzen und sogenannte kritische Deskriptoren bzw. kritische Kenngrößen für die Umfeldler zu ermitteln. Daraus lassen sich Trendprojektionen für den festgelegten Zeitraum ableiten. Mithilfe einer Konsistenzmatrix findet eine logische und konsistente Annahmenbündelung der oben genannten Entwicklungstendenzen statt. Aus diesen Bündeln werden abschließend jeweils paarweise Kombinationen der kritischen Kenngrößen nach den Kriterien Konsistenz, Unterschiedlichkeit und evtl. Wahrscheinlichkeit ausgewählt. Die Kombinationen stellen die Basis der zu formulierenden Szenarien dar. Die ausgewählten Umfeldszenarien werden interpretiert und mögliche Szenarien ausgebaut. Die Annahmebündelung berücksichtigte bereits die kritischen Kenngrößen. Nun werden gleichermaßen unkritische Kenngrößen hinzugefügt. Der Zeitraum, in welchem die Szenarien stattfinden, ist festzulegen und Zwischenereignisse bis zum Endzustand des Szenarios sind zu definieren. Des Weiteren ist eine Analyse von möglichen und signifikanten Störereignissen durchzuführen. Sie werden identifiziert, interpretiert und in die Szenarien eingearbeitet.

Abschließend sind alle wahrscheinlichen Kombinationen aus Umfeld- und Untersuchungsfeld-Szenarien gegenüberzustellen, Probleme zu identifizieren und entsprechende Lösungsansätze zu entwickeln. Dabei ist das Normalszenario zu bestimmen, das für das zu entwickelnde Monitoringprogramm die Grundlage darstellt. Weiterhin muss die Planung ausgewählte abweichende Szenarien, wie z. B. einen Wassereintritt während der Betriebsphase in ein Tiefenlager im Steinsalz, beachten. Anhand dieser Methodik wurden Referenzszenarien für alle betrachteten Wirtsgesteine erstellt.

Untersuchungsfeld und Einflussfaktoren. Das Ziel des Schutzes vor der ionisierenden Strahlung sowie der während der Offenhaltung zu gewährleistende Arbeitsschutz grenzen zunächst das Untersuchungsfeld ein. Die zeitliche Betrachtung beschränkt sich auf die Betriebsphase und die Beobachtungsphase des Tiefenlagers. Da sich die konkrete Planung der Auslegung des Tiefenlagers noch in der Zukunft befindet, haben die Einflussfaktoren, die direkt mit dieser zusammenhängen, selbst eine gewisse Streubreite. Die Abbildung 5.88 verdeutlicht dieses in Form eines Gedankenprismas. Die generischen Modelle gehen von einer wartungsfreien Einlagerungsphase von ca. 40 Jahren aus. Um den Einlagerungsbetrieb nicht durch Sanierungsarbeiten zu gefährden, müssen die geotechnischen Schutzeinrichtungen innerhalb dieser Spanne einwandfrei funktionieren.

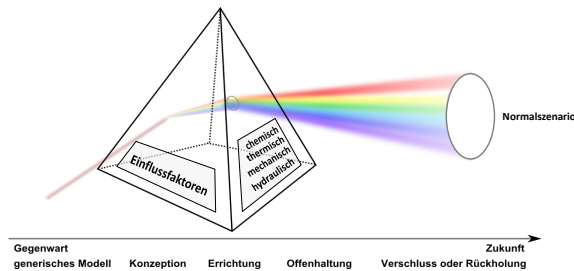


Abbildung 5.88: Sinnbildliche Darstellung des Normalszenarios innerhalb denkbarer Zukunftsprojektionen.

Räumlich sind der Infrastrukturbereich des Tiefenlagers, die Einlagerungsstrecke und ihr Verschlussbauwerk zu betrachten. Der vom Schacht beeinflusste Bereich wird bei der Erstellung der Szenarien vernachlässigt. Die Einflussfaktoren lassen sich im Wesentlichen in sechs Kategorien einordnen:

- geometrische Einflussfaktoren,
- mechanische Einflussfaktoren,
- thermische Einflussfaktoren,
- hydraulische Einflussfaktoren,
- chemische Einflussfaktoren und
- radiologische, strahlungsbedingte Einflussfaktoren.

Die Herausforderung besteht darin, dass diese Faktoren miteinander gekoppelt sind. Sie beeinflussen sich gegenseitig, was wiederum die Erstellung von Projektionen erschwert. Die geometrischen Einflussfaktoren sind durch das generische Modell in jedem Wirtsgestein gleich, wobei in Ton und Tonstein ein Ausbau benötigt wird, der das auszubrechende Hohlraumvolumen vergrößert.

Die wesentlichen mechanischen Eigenschaften sind durch die Materialeigenschaften des Gebirges und den in-situ-Spannungszustand gegeben. Der Spannungszustand hängt maßgeblich von der tektonischen Lage des Tiefenlagers und insbesondere von seiner Teufe ab. Die Materialeigenschaften der Wirtsgesteine wurden bereits im Abschnitt 3.2.5 erläutert.

Die thermischen Einflussfaktoren sind die jeweilige thermische Leitfähigkeit und Wärmekapazität des Gebirges sowie der Ausdehnungskoeffizient. Sie bestimmen, wie sich die Wärme im Gebirge und dem Versatz ausbreitet. Weiterhin ist die durch den geothermischen Gradienten beeinflusste und von der Teufe abhängige in-situ-Temperatur zu berücksichtigen.

Bei den hydraulischen Faktoren spielen die Permeabilität des betrachteten Bereichs und die Fragestellung, ob es im Tiefenlagersystem frei fließendes Grundwasser gibt, eine Rolle.

Da der Fokus auf der gebirgsmechanischen Fragestellung liegt, werden die radiologischen und chemischen Einflussfaktoren weniger stark gewichtet als die mechanischen, thermischen und hydraulischen Faktoren.

Normalszenarien. Für jedes betrachtete Wirtsgestein wurde mit der erläuterten Methodik ein Normalszenario erstellt. Dafür wurden jeweils drei Bereiche betrachtet: Die offengehaltenen Hohlräume, bestehend aus dem Infrastrukturbereich und den Monitoringstrecken, der versetzte Bereich mit den eingelagerten Reststoffen sowie der Bereich des Verschlussbauwerks. Die wesentlichen Eigenschaften der Wirtsgesteine sind in Tabelle 3.2 im Abschnitt 3.2.5 aufgelistet. Abbildung 5.89 gibt einen Eindruck der Spannungen und der Permeabilitäten innerhalb einer Einlagerungstrecke in Steinsalz, Ton / Tonstein und in kristallinem Hartgestein.

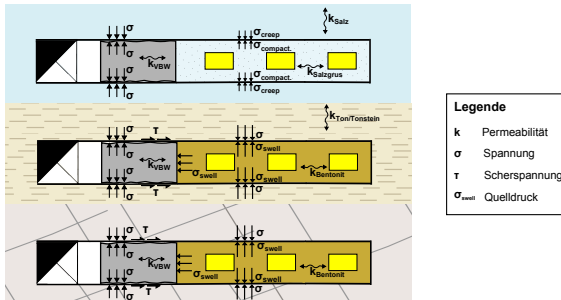


Abbildung 5.89: Spannungen und Permeabilitäten in den versetzten Einlagerungsbereichen in Steinsalz (oben), Ton / Tonstein (Mitte) und kristallinem Hartgestein (unten).

In der nächsten Aufzählung werden die Normalszenarien für die unterschiedlichen Wirtsgesteine und für sie jeweils die einzelnen zu betrachtenden Bereiche dargestellt. Dabei werden zunächst die relevanten Ein-

flussfaktoren und die Normalentwicklung in der Infrastruktur, der Einlagerungsstrecke und des Verschlussbauwerks dargestellt.

- Normalszenario für ein Tiefenlager im Steinsalz
Das Normalszenario für ein Tiefenlager im Steinsalz unterscheidet sich aufgrund der Kriechfähigkeit, der mittleren mechanischen Festigkeit und der Impermeabilität des Steinsalzes deutlich von den übrigen Wirtsgesteinen. Grundwasser ist im Normalszenario nicht zu berücksichtigen. Die hohe Wärmeleitfähigkeit sorgt für eine großflächige Verteilung der Wärme im Wirtsgestein (siehe Abschnitt 3.2.5).

Vor der Auffahrung herrscht im Gebirge ein isotroper Spannungszustand. Dieser wird durch die Auffahrung gestört. Es bildet sich eine Auflockerungszone aus. Das Gebirge strebt wiederum einen isotropen Spannungszustand an, der entstandene Spannungsdeviator wird durch Kriechprozesse abgebaut. Das Kriechen des Salzes erfolgt zeitabhängig und verursacht Konvergenzen des Hohlraums. Um den erforderlichen Lichtraum in den offengehaltenen Hohlräumen zu gewährleisten, muss daher ein regelmäßiger Nachschnitt erfolgen. Das Nachschneiden der Hohlraumkontur schädigt die Barriere, weil Material aus der geologischen Barriere entfernt wird und eine erneute Auflockerungszone entsteht. Es kann daher nicht beliebig oft nachgeschnitten werden, der Offenhaltungszeitraum unterliegt einer gebirgsmechanisch bedingten Begrenzung. Wann der Zeitpunkt zur Überführung des Tiefenlagers in ein wartungsfreies Endlager oder alternativ zur Rückholung und Suche einer alternativen Lagerungsform gekommen ist, lässt sich durch Monitoring bestimmen. Es liefert die Information über die Schädigung der Barriere.

Die Einlagerungsstrecke wird direkt nach der Einlagerung mit Salzgrus versetzt. Durch seine Eigenkompaktion bildet sich zunächst ein Firstspalt aus. Die Konvergenz in den Strecken verlangsamt sich daher aus diesem Grunde kaum. Sie erhöht sich hingegen aufgrund des Wärmeintrags der eingelagerten Reststoffe. Mit Erreichen eines form- und kraftschlüssigen Verbunds zwischen Wirtsgestein und Versatz, wird der Salzgrus unter Reduktion seiner Porosität und Erhöhung seiner Dichte weiter kompaktiert. Dies bewirkt eine Erhöhung der Steifigkeit, sodass sich ein Gegendruck zum Gebirgsdruck, d. h. ein Ausbauwiderstand, aufbauen kann und sich der Spannungsdeviator verringert. Nach ausreichend langer Zeit unterscheidet sich der Salzgrus in seinen mechanischen Eigenschaften kaum vom ursprünglichen Wirtsgestein.

Das Verschlussbauwerk aus Salzbeton wird nach dem Versatz jeder Einlagerungsstrecke errichtet. Die Hydratationswärme führt zunächst zu

einer Volumenzunahme, nach dem Abbinden infolge der Auskühlung dann aber zu einer Kontraktion des Bauwerks. Diese bedingt einen Spalt zwischen Gebirge und Verschlussbauwerk, der zwar nachverpresst, aber nicht vollständig vermieden werden kann. Das Kriechen des Gebirges schließt den Spalt nach einer gewissen Zeit und das Verschlussbauwerk erreicht seine volle Funktionalität. Durch die im Vergleich zum umgebenden Gebirge höhere Steifigkeit führt zu einer Spannungskonzentration im Bereich des Verschlussbauwerkes, das dann wie ein zusätzlicher Pfeiler wirkt.

- Normalszenario für ein Tiefenlager im Ton

Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Normalentwicklung sind im Ton eine geringe Eigentragfähigkeit, eine Empfindlichkeit gegenüber Änderungen im chemischen Milieu (Alteration von Tonmineralen, Austrocknung) und eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Grundwasser tritt aufgrund der geringen Permeabilität nur stagnierend auf. Der Porenwasserdruck ist jedoch ein wichtiger Einflussfaktor bei der Beurteilung der Tragfähigkeit des Gebirges.

Die mit der Auffahrung verbundene Spannungsumlagerung erzeugt im Ton aufgrund seiner geringen Festigkeit eine Schädigung des Wirtsgesteins, die weit in das Gebirge hineinreichen kann. Deswegen und auch wegen seiner geringen Eigentragfähigkeit sind Hohlräume nach ihrer Auffahrung mit einem massiven Ausbau zu sichern. Durch ihn werden die Konvergenzen des Hohlraums wiederum wesentlich verringert. Die Steifigkeit des Ausbaus ist deutlich höher als die des Gebirges, sodass im Wesentlichen der Ausbau die Lasten aus dem Gebirge abträgt. Die Ausbaumaterialien können im Wirtsgestein Effekte einer Austrocknung und Alteration hervorrufen. Zusätzlich können die Ausbaumaterialien mit der Feuchte aus der Bewetterung und der Wärme der eingelagerten Behälter chemisch reagieren. Diese Reaktionen führen zu einer Alterung des Ausbaus und folglich zu einem Verlust seiner Tragfähigkeit. Diese Alterung lässt sich in den offengehaltenen Bereichen direkt messtechnisch bestimmen, um ggf. mit Sanierungsmaßnahmen reagieren zu können.

Die Einlagerungsstrecke wird nach der Einlagerung eines Behälters mit Bentonit in Form von (angefeuchteten) kompaktierten Blöcken versetzt. Das vorherige Entfernen des Ausbaus ist risikobehaftet, er verbleibt daher in der Einlagerungsstrecke. Um Wasserwegsamkeiten um die Einlagerungsstrecke herum zu unterbinden, können Schlitzte im Ausbau angelegt werden, an denen der Bentonitversatz eine direkte Kontaktfläche zum Wirtsgestein hat. Durch die Befeuchtung der Ben-

tonitblöcke quillt der Bentonit. Nach der vollständigen Bestückung der Einlagerungsstrecke und sobald das Verschlussbauwerk errichtet ist, kann sich aufgrund des begrenzten freien Volumens ein Quelldruck aufbauen. Er wirkt dem Gebirgsdruck entgegen und erzeugt so einen Abbau des Spannungsdeviators. Dadurch werden die Spannungsumlagerungen im Wirtsgestein weiter reduziert und eine weitere Schädigung des Wirtsgesteins verhindert. Die eingebrachte Wärme des Behälters sorgt an der Grenze vom Behälter zum Bentonit zu einer partiellen Austrocknung und somit zu einem Dampfüberdruck, der sich auf den direkten Nahbereich beschränkt. Im Gebirge tritt nach einiger Zeit eine Wiederaufsättigung auf. Durch die Plastizität und Quellfähigkeit schließen sich die Risse und die bei der Hohlraumauffahrung entstandene plastische Zone wird hydraulisch unwirksam.

Vor der Errichtung des Verschlussbauwerks ist der Ausbau zu entfernen. Aufgrund der geringen Eigentragfähigkeit kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass ein vollständiger Rückbau möglich ist. Das Verschlussbauwerk besteht aus einem Bentonitabdichtungselement und einem Niedrig-pH-Betonwiderlager. Zunächst wird das Abdichtungselement eingebracht. Der Bentonit baut durch den Kontakt mit dem im Ton vorhandenen Wasser einen Quelldruck auf und verschließt damit die verbleibenden Hohlräume. Um den Quelldruck in Richtung des offenen Hohlraums aufnehmen zu können, muss das Widerlager errichtet werden. Aufgrund des Quelldrucks des Bentonits und der hohen Steifigkeit des Widerlagers kommt es zu einer Spannungskonzentration im Bereich des Verschlussbauwerkes, das dann wie ein zusätzlicher Pfeiler wirkt. Das Widerlager muss daher ausreichend dimensioniert sein, um sowohl die Spannungen aus dem Gebirge als auch den Quelldruck des Bentonits aufnehmen zu können.

- Normalszenario für ein Tiefenlager im Tonstein

Tonstein besitzt im Gegensatz zu Ton eine mittlere Eigentragfähigkeit. Durch das Trennflächengefüge ist der Spannungszustand im Gebirge stark anisotrop. Grundwasser kann entlang von Trennflächen fließen, dennoch ist die Permeabilität des Gebirges gering. Die chemische Sensibilität eines Tonsteins ist geringer als die eines Tons.

Die Ausdehnung der durch die Auffahrung entstehenden plastischen Zonen ist weniger ausgeprägt als im Ton. Die Zonen haben jedoch aufgrund der geringeren Plastizität und Quellfähigkeit des Wirtsgesteins eine höhere Permeabilität. Ihre Geometrie ist stark abhängig von der Lage der Haupttrennflächenschar. In einem saiger liegenden Gebirge ist diese elliptisch um den Hohlraum mit der stärkeren Ausprägung in ho-

horizontaler Richtung ausgebildet. Das Einbringen eines Ausbaus behindert eine weitere Ausdehnung der plastischen Zonen während der Offenhaltungsphase. Die Prämisse der Wartungsfreiheit erfordert einen steifen Ausbau, da zu große Konvergenzen den Einlagerungsbetrieb stören können. Da das Gebirge nach dem Ausbruch eine gewisse Eigentragfähigkeit entwickelt, ist es sinnvoll, zunächst die Konvergenzen des Gebirges zuzulassen und nach dessen Abklingen auf ein bestimmtes Niveau den Ausbau einzubringen. Das Gebirge trägt mit und der Ausbau kann weniger mächtig dimensioniert werden.

Nach der Einlagerung wird der Ausbau in den Einlagerungsstrecken ggf. beraubt und die Strecken werden mit Bentonit verfüllt. Dabei stellt sich wie im Ton durch die Befeuchtung der Bentonitblöcke ein Quellen des Bentonits ein. Sobald das Widerlager hergestellt ist und das frei verfügbare Volumen somit begrenzt ist, baut sich auch hier ein Quelldruck auf. Er bewirkt eine formschlüssige Füllung der Resthohlräume, und auch in geringem Maße eine Reduktion der plastischen Zone um die Einlagerungsstrecke herum. Durch die Wärme der eingelagerten Reststoffe kommt es wie im Ton in unmittelbarem Kontakt zum Behälter zu einer partiellen Austrocknung im Bentonitversatz. Die dabei entstehende Gasphase wirkt zusätzlich zur Wasserphase und erhöht somit den Porenwasserdruck im Versatz. Der Überdruck beschränkt sich jedoch auf den direkten Nahbereich.

Vor der Errichtung des Verschlussbauwerks im Tonstein werden der Ausbau und die hydraulisch durchlässigeren Bereiche der plastischen Zone entfernt. Das Verschlussbauwerk besteht wie im Ton aus einem Abdichtungselement aus Bentonit und einem Widerlager aus einem Niedrig-pH-Beton. Die Abdichtung der Zone mit erhöhter Permeabilität beginnt, sobald das Abdichtungselement mit Wasser in Berührung kommt. Der Bentonitanteil quillt auf und dehnt sich aus, bis der Hohlraum zwischen Versatz und Widerlager komplett ausgefüllt ist. Anschließend bildet sich ein Quelldruck aus, der abdichtend und dem Gebirgsdruck entgegen wirkt. Das Widerlager muss ausreichend dimensioniert sein, um die Spannungen aus dem Gebirge und den Quelldruck des Bentonits abtragen zu können. Da das Verschlussbauwerk eine höhere Steifigkeit als das Gebirge besitzt, kommt es zu einer Spannungskonzentration im Bereich des Verschlussbauwerkes, das dann wie ein zusätzlicher Pfeiler wirkt.

- Normalszenario für ein Tiefenlager im kristallinen Hartgestein
Kristallines Hartgestein hat eine hohe Steifigkeit und Eigentragfähigkeit. Gegenüber chemischen Alterationen ist es unsensibel. Grundwas-

ser bewegt sich aufgrund der im Gebirge vorhandenen Trennflächen frei fließend. Beim Auffahren des Hohlraums entsteht auch im kristallinen Hartgestein je nach Ausbruchmethode eine Auflockerungszone (ALZ), die jedoch nur sehr gering ausgeprägt ist. Da kristallines Hartgestein eine hohe mechanische Stabilität aufweist, verändert sich die ALZ während der Offenhaltung nur geringfügig. Aufgrund der hohen mechanischen Stabilität bildet sich ein Gebirgstragring aus und das Gebirge trägt sich selbst. Da kristallines Hartgestein Trennflächen aufweist, muss dennoch zur Sicherung des Hohlraums geankert werden. In stark geklüfteten Bereichen ist ein Spritzbetonausbau vorzusehen um Gleitkeile zu sichern und auch um das in den Grubenbau eintretende Grundwasser kontrolliert fassen und abführen zu können. Beim Auffahren und Betrieb des Tiefenlagers ist eine ausreichend dimensionierte Wasserhaltung erforderlich. Nach der Einlagerung der Behälter in die Einlagerungsstrecke wird sie mit Bentonit versetzt. Der Versatz verhält sich gleichermaßen wie in Ton und Tonstein, er quillt bei Wasserzutritt auf und verfüllt nach Errichtung des Widerlagers den restlichen Hohlraum der Einlagerungsstrecke. Der Bentonit quillt dabei bevorzugt an den Klüften auf. Sie stellen diskrete Bereiche im Wirtsgestein und Wassergefahren dar. Auch eine Erosion des Bentonits ist bei starkem Wasserzufluss möglich. Im Vergleich zu den anderen Wirtsgesteinen verheilen Trennflächen und somit Klüfte im Gebirge nicht selbst. Der Versatz übernimmt im kristallinen Hartgestein somit vorrangig eine abdichtende und keine stützende Funktion. Das Verschlussbauwerk besteht auch hier aus einem Abdichtungselement und einem Widerlager. Es ist auf eine ausreichende Dimensionierung des Widerlagers und einen kraftschlüssigen Verbund zwischen Widerlager und Wirtsgestein zu achten, sodass sich das Widerlager nicht axial in Richtung der offengehaltenen Hohlräume bewegen kann. Das Abdichtungselement verhindert beim Absaufen des Grubengebäudes den direkten Zutrittspfad in die Einlagerungsstrecke.

Messkonzept. Das Monitoringprogramm ist Bestandteil des Sicherheitsnachweiskonzepts und orientiert sich an den Schutzfunktionen der einzelnen Nachweiskomponenten. Ziel des Monitorings ist es, bestimmen zu können, ob sich die Entwicklung des Tiefenlagers innerhalb des erwarteten Normalszenarios befindet oder ob eine davon abweichende unerwartete negative Entwicklung stattfindet. Das Messkonzept wurde auf der Grundlage der folgenden Fragen erstellt (siehe auch MoDeRn, 2013):

- Warum wird gemessen?

- Wo wird gemessen?
 - Was wird gemessen?
 - Wie wird gemessen?
 - Wann wird gemessen?
- Zu instrumentierende Bereiche des Tiefenlagers
Das Messprogramm soll während der Offenhaltungsphase im offengehaltenen Infrastrukturbereich sowie im Nahbereich der eingelagerten Reststoffe umgesetzt werden. Die maßgebenden Bereiche zur Datenerfassung im Nahfeldbereich sind die Kontaktflächen Versatz / Wirtsgestein und Verschlussbauwerk / Wirtsgestein sowie der hohlraumnahe Bereich des Wirtsgesteins. Zusätzlich stellen auch die Kontaktflächen Behälter / Versatz sowie die Luftseite des Verschlussbauwerks weitere relevante Bereiche dar (siehe Abbildung 5.90).

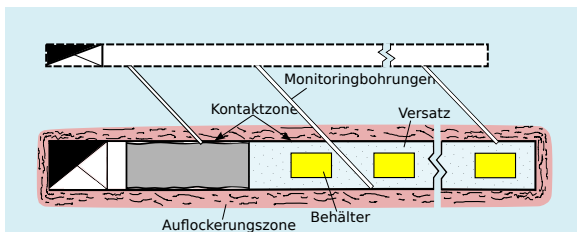


Abbildung 5.90: Orte exponierter Zustandsänderungen im Bereich der Einlagerungsstrecke.

Die genaue Anzahl und der Ort der Messstellen sind bei der Exploration des Tiefenlagers zu bestimmen. Auf der Grundlage identifizierter und damit festgelegter Homogenbereiche gleicher Gebirgs- und Einlagerungsverhältnisse sind die Messlokationen festzulegen. Die messtechnische Überwachung jeder einzelnen Einlagerungsstrecke und des gesamten Infrastrukturbereichs ist hierdurch nicht unbedingt erforderlich.

- Parameter und Messmethoden
Um die Entwicklung der Integrität der geotechnischen und geologischen Barriere nachvollziehen zu können, müssen unterschiedliche Parameter bestimmt werden. Diese lassen sich in mechanische, thermische, chemische und hydraulische Parameter unterteilen.

Mechanische Parameter sind die in der geologischen und geotechnischen Barriere vorherrschenden Spannungen, die Konvergenzen bzw. Verschiebungen und, sofern Grundwasser im Wirtsgestein vorhanden ist, die Porenwasserdrücke. Spannungen bzw. Spannungsänderungen infolge Spannungsumlagerungen im Gebirge oder Quellen des Bentonits lassen sich mit ausgerichteten Druckkissen messen. Diese müssen, um aussagekräftige Daten liefern zu können, nach dem Einbau einen formschlüssigen Verbund zum Gebirge haben. Mit den Spannungsumlagerungen im Gebirge entwickelt sich ein kraftschlüssiger Verbund, der die Austauschbarkeit der Geber erschwert. Ausgetauschte Spannungsgeber müssen daher mit Injektionsleitungen ausgestattet werden. Als alternative Messmethodik können auch faseroptische Sensoren verwendet werden. Konvergenzen lassen sich in offengehaltenen Bereichen als Verschiebungen der Hohlraumkontur messen. Dafür kommen markscheiderische Methoden zum Einsatz. Im Gebirge sowie in den geotechnischen Barrieren sind Extensometer, Inklinometer und Dehnungsgeber anzuordnen. Porenwasserdrücke und deren Veränderungen sind in den aus Bentonit hergestellten Barrieren sowie in den Wirtsgesteinen Ton und Tonstein zu erfassen.

Infolge der Wärmeabstrahlung der Einlagerungsbehälter entstehen zeitlich veränderliche Temperaturfelder im Gebirge sowie in den geotechnischen Barrieren, die einen Einfluss auf deren Verhalten haben und somit beobachtet werden sollen. Darüber hinaus sind die Temperaturen in den offengehaltenen Grubenräumen aus arbeitstechnischen Gründen zu kontrollieren und ggf. zu beeinflussen.

Als chemische Parameter sollten das Redox-Potential und der pH-Wert des Grundwassers bestimmt werden, um potentielle Änderungen aufgrund des Einbringens der geotechnischen Barriere feststellen zu können. Dies lässt u.a. Rückschlüsse auf die Bewegung des Grundwassers im Tiefenlagersystem zu.

Die hydraulischen Parameter, d. h. die Permeabilität der Barrieren und der plastischen Zone bzw. der Auflockerungszone, sind nicht direkt bestimmbar. Hier kann auf geophysikalische Methoden zurückgegriffen werden. Die Geoelektrik gibt Aufschluss über den elektrischen Widerstand des betrachteten Bereichs. Mit ihm lassen sich für Tiefenlager mit bentonitbasiertem Versatz Rückschlüsse auf den Sättigungsgrad des Bentonits schließen. Er hängt wiederum mit der Permeabilität zusammen. Weiterhin geben der Spannungs-Dehnungszustand und die Zustandsveränderungen einen indirekten Hinweis auf die Permeabilitätsentwicklung. Im Steinsalz kann stattdessen die seismische Ge-

schwindigkeit im Salzgrus gemessen werden. Sie lässt Rückschlüsse auf die Entwicklung seiner Kompaktion und somit auf die Permeabilität zu.

Die mit der Entwicklung von plastischen Zonen einhergehenden lokalen Überschreitungen der Bruchfestigkeit des Wirtsgesteins, aber auch der geotechnischen Barrieren können mit mikroseismischen Messungen erfasst und auch lokalisiert werden. Daraus können Rückschlüsse auf die Entwicklung der mechanischen und hydraulischen Integrität der geologischen Barriere gezogen werden.

- **Stand der Technik**

Die Zuverlässigkeit der Datenerfassung ist derzeit die Hauptschwachstelle. Die infolge der Rückholoption erforderliche Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten bis Jahrhunderten kann nach dem heutigen Stand der Technik für die Elemente der Messkette nicht gewährleistet werden. Diese müssen daher nicht zulässt aus den im interdisziplinären Teil des Abschlussberichtes erläuterten Konsequenzen unplausibler oder fehlender Daten austauschbar sein. Insbesondere der Austausch von Messgebern stellt dabei eine Herausforderung dar. Eine mögliche Lösung ist der generelle Einsatz von Messgebern in Bohrungen. Hier sind dann die Anbindung der Geber an das umgebende Material und deren Reversibilität von Bedeutung. Lösungsansätze hierfür existieren bereits, die Erfahrungen damit sind aber noch unzureichend. Aufgrund der prinzipiellen Austauschbarkeit erübrigen sich im Folgeschluss Überlegungen zum kabellosen Datentransfer und zur autarken Stromversorgung. Die Bohrlöcher, die für die Austauschbarkeit erforderlich sind, können zum kabelgebundenen Datentransfer und zur Stromversorgung genutzt werden.

- **Minimallösung**

Ein Monitoringprogramm, das auf kabelgebundenen Technologien für die Energieversorgung und den Datentransfer basiert, geht zwangsläufig mit einer Schädigung der Barrieren einher. Um diese Schädigungen möglichst gering zu halten, wurde im Projekt eine Minimallösung konzipiert. Sie zeigt auf, welche Parameter bzw. welche Messungen als Entscheidungsgrundlage mindestens notwendig sind, um die Entscheidung Rückholung oder Überführung des Tiefenlagers in ein wartungsfreies Endlager treffen zu können.

In allen Wirtsgesteinen spielt der Einschluss der radioaktiven Reststoffe die entscheidende Rolle. Im Steinsalz hängt dieser maßgeblich vom Aufkriechen des Gebirges ab, während für die Wirtsgesteine Ton, Tonstein und Kristallin die Quelldruckentwicklung des Versatzes und des Abdichtungsbauwerks aus Bentonit bestimmend sind. Daher beinhaltet

die Minimallösung die Messung der in-situ-Spannungen im Kontaktbereich Versatz / Wirtsgestein und Abdichtungsbauwerk / Wirtsgestein. So lässt sich eine planmäßige, oder aber auch unplanmäßige Entwicklung der Spannungen infolge des Aufkriechens des Gebirges bzw. des Quelldrucks feststellen. Um die Spannungen messen zu können, sind Druckkissen in den genannten Bereichen einzubauen. Der Daten- und Energietransfer erfolgt kabelgebunden über Bohrungen zwischen Einlagerungsstrecke und Monitoringsohle.

Weiterhin sieht die Minimallösung das Messen der Konvergenzen des Gebirges vor. Die Konvergenzen gehen mit der Entstehung einer geschädigten Zone einher, die eine höhere Permeabilität als das intakte Gebirge aufweist und somit eine potentielle Wegsamkeit für Fluide darstellt. Diese Schädigung ist nur bis zu einem gewissen Grad tolerierbar, sodass die Offenhaltung zeitlich begrenzt werden muss. Die Messung der Konvergenzen ermöglicht eine Einschätzung des Schädigungsgrades sowie seiner Entwicklung und dient somit der Terminierung des Zeitpunkts, an dem die Offenhaltung beendet werden muss. Diese Messungen sind durch mikroseismische / mikroakustische Messungen zu unterstützen. Da Kristallin nur geringe Konvergenzen zeigt, sind diese Messungen hier weniger relevant.

In allen Wirtsgesteinen stellt die Temperatur unter Tage einen wichtigen Faktor für eine potentielle Rückholung dar. Hinsichtlich der Arbeitsbedingungen darf sie gewisse Grenzen nicht überschreiten. Im Falle der Entscheidung für eine Rückholung werden die wärmeentwickelnden radioaktiven Reststoffe wieder freigelegt, was Einfluss auf die Temperatur der Wetter hat. Um vor der konkreten Umsetzung der Rückholung diese Temperaturen einschätzen zu können, sind die in-situ-Temperaturen in der Monitoringsohle, den Bohrlöchern zwischen Monitoringsohle und Einlagerungsstrecke sowie im Bereich der Kontaktzone Versatz / Wirtsgestein zu messen. Neben den Messungen im Rahmen der Minimallösung ist es ggf. sinnvoll, weitere wenig invasive Messmethoden der Geophysik einzusetzen.

- Konsequenzen des Monitorings

Den positiven Aspekten der Beobachtbarkeit der Entwicklung im Tiefenlager und der Möglichkeit darauf reagieren zu können, stehen einige negative Aspekte gegenüber. Im Vergleich zu einem nicht instrumentierten wartungsfreien Endlager beeinflusst das Tiefenlager mit Rückholoption die Langzeitsicherheit ungünstig. Diese Beeinflussung ergibt sich zum einen aus den zusätzlich aufgefahrenen Hohlräumen, was im Speziellen die Monitoringsohle und die für die Instrumentierung der

Einlagerungsbereiche benötigten Bohrungen umfasst. Der Einlagerung schließt sich eine verlängerte Offenhaltung an, die bei kriechfähigen Wirtsgesteinen zu einer weiteren Schädigung der Barriere führt. Bohrungen stellen während des Offenhaltungsbetriebs zudem Wasserwegsamkeiten dar.

Andererseits kann mit entsprechenden Gegenmaßnahmen auf unplanmäßige Entwicklungen reagiert werden kann. Dabei kann das Konzept des Life-Cycle-Engineerings hilfreich sein.

Durch die Verfüllung aller Hohlräume, die mit der Überführung des Tiefenlagers in ein wartungsfreies Endlager erfolgt, bilden sich in kriechfähigen Wirtsgesteinen die Schädigungen zurück, sodass von einer nur temporären Schädigung der Barriere ausgegangen werden kann. Das zusätzliche technische Risiko ist durch die zeitliche Begrenzung der Offenhaltungsphase somit handhabbar.

Adaption der Methoden des Life-Cycle-Engineerings für die Tiefenlagerung

Life-Cycle-Engineering (LCE) im Bauwesen beschäftigt sich mit dem Lebenszyklus eines Bauwerks aus technischer Sicht. Dabei sind bereits in der Planung Maßnahmen zu berücksichtigen, die über den Lebenszyklus zur Erhaltung des Bauwerkes umgesetzt werden müssen. LCE für Bauwerke heißt, diese während aller Lebensphasen zu begleiten und anhand unterschiedlicher Kriterien zu beurteilen, um ihre Funktionalität gewährleisten zu können.

Mittels LCE soll die Lebensdauer des Bauwerks durch geeignete technische Maßnahmen verlängert werden. Diese Maßnahmen sollen dabei zu einem Zeitpunkt innerhalb des Lebenszyklus umgesetzt werden, an dem das Bauwerk zwar bereits einer gewissen Degradation unterliegt, jedoch noch funktionsfähig ist. Es gilt somit, den passenden Zeitpunkt sowie die passenden Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen zu definieren. Grundlage hierfür stellt zunächst die Kenntnis des aktuellen Zustands des Bauwerks dar. Hier ist das Monitoring des Bauwerkes wesentlich, denn es kann mit der kontinuierlichen Beobachtung von Variablen die Zustandsbewertung und die Zuverlässigkeit der Zustandsprognose entscheidend verbessern. Sind die relevanten Parameter, welche die Degradation des Bauwerks maßgeblich beeinflussen, bekannt, lässt sich ein geeignetes Monitoringprogramm zur Erfassung des Zustands entwickeln.

Die im Rahmen von ENTRIA entwickelten generischen Tiefenlagermodelle mit der Option der Rückholung stellen in Bezug auf das LCE eine Herausforderung dar. Anders als bei gewöhnlichen Ingenieurbauwerken, wie z. B. Hochhäuser, Brücken, usw., gibt es bei der Tiefenlagerung von

hoch radioaktiven Reststoffe kaum Vergleichsbauwerke, anhand derer Schwachstellen ausfindig gemacht werden können. Das Verhalten des Tiefenlagers lässt sich folglich nur anhand numerischer Berechnungen zur Sensitivität sowie Prognosen beschreiben.

Auf der Grundlage des LCE waren die erforderlichen Sanierungsmaßnahmen und -zeitpunkte während der Offenhaltungsphase zu identifizieren, um die Dauerhaftigkeit und Funktionalität der Einlagerungsstrecken und Infrastrukturstrecken, Schächte und Abdichtungsbauwerke gewährleisten zu können. Weiteres hierzu ist im Arbeitsbericht „Adaptation der Methodik des Life-Cycle-Engineerings auf die Beobachtungsphase eines Tiefenlagers“ zu finden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in einem Tiefenlager für hoch radioaktive Reststoffe die Lebensdauer und die Entwicklung der geologischen und geotechnischen Barrieren, insbesondere der geotechnischen Schutzsysteme, von entscheidender Relevanz sind. Basierend auf den Erfahrungen aus Untertagelaboren, Untertagedeponien, Tunnelbau und Bergbau lässt sich die Prognose über ihr Verhalten erstellen und diese Informationen als Validierung der konzeptionellen Prognosen zu verwenden. Über den Zeitraum der Offenhaltung wird wie bereits erwähnt innerhalb eines Monitoringprogramms die Funktion der geotechnischen Schutzsysteme beobachtet. Abschließend ist festzuhalten, dass das Monitoring darüber hinaus auch Aspekte der Degradation des Bauwerks aufgrund chemischer Prozesse wie Korrosion beinhalten kann. Entsprechend der möglichen Zustandsänderungen lässt sich ein Maßnahmenkatalog entwickeln, um auf die entsprechenden Entwicklungen reagieren zu können, die Funktion des Bauwerks zu erhalten und seine Lebensdauer zu verlängern.

Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse werfen weiterführende Fragen auf: Zur Abschätzung der weiteren Konsequenzen der Rückholbarkeit, ist es erforderlich, den eigentlichen Rückholprozess in die Überlegungen mit einzubeziehen. Die Rückholung der Reststoffe sollte einen Sicherheitsgewinn gegenüber deren Verbleib im Tiefenlager bringen. Deshalb muss der Rückholprozess konkret geplant und beschrieben werden. Dafür ist zu untersuchen, inwiefern die Standsicherheit der aufgefahrenen Hohlräume während der Rückholung gegeben ist bzw. wie sie hergestellt werden kann.

Die gebirgsmechanischen Konsequenzen der aus dem Rückholprozess resultierenden Spannungsumlagerungen müssen erarbeitet werden. Da bei einem Verbruch von einer unkontrollierbaren Ausbreitung von Radio-

nukliden ausgegangen werden muss, ist das Risiko eines Verbrauchs der aufgewältigten Strecken zu analysieren. Anhand dessen kann ein Risikovergleich mit der Option der Endlagerung durchgeführt werden. Die Auslegung des Tiefenlagers ist auf Basis des Rückholprozesses und dem stochastischen Verhalten des Gebirges zu überprüfen und weiter zu detaillieren.

Der Rückholprozess ist auch messtechnisch zu begleiten. Die Messdaten können hilfreich sein, den Zustand der aufzuwältigenden Einlagerungsstrecken zu beurteilen und ggf. weitere Arbeitsschutzmaßnahmen für die Rückholung zu planen. Auch hier sind die systembedingten Streuungen der Messergebnisse mit in die Überlegungen einzubeziehen.

5.6.3 Institut für Werkstoffkunde (IW)

Zur Bearbeitung beider Arbeitspakete wurden die Einflüsse einzelner Gestaltungsaspekte auf die Wechselwirkung der Behälter mit ihrem Umfeld bereits bestehender Lagerbehälterkonzepte untersucht. Darüber hinaus wurden die Randbedingungen der Behälterhandhabung im Rahmen der Rückholung identifiziert. Hierzu wurden im stetigen Austausch von Daten aus den beiden Arbeitspaketen 6.5 und 6.6 Behälterdossiers erarbeitet. Aufbauend auf dieser Datenbasis konnte eine vergleichende Bewertung konzeptioneller Behältermerkmale sowie einzelner Detaillösungen der Behälterkonzepte bezüglich Aspekten der Rückholbarkeit sowie der Behälterentwicklung im Tiefenlager erfolgen. Zur weiteren Bearbeitung der AP war es erforderlich, die gewonnenen Daten auf die Randbedingungen des ENTRIA-Optionenvergleiches zu übertragen, welche sich beispielsweise aus dem vorhandenen Abfallmengengerüst und der Geologie potentieller Lagerstätten in Deutschland ergeben. Zusätzlich musste eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Wirtsgesteine innerhalb der Option der Tiefenlagerung gewährleistet werden.

Dieses Ziel konnte durch die Variation internationaler Konzepte nicht erreicht werden, da diesen zugrundeliegenden Anforderungen zu stark voneinander abweichen. Als Lösung für dieses Problem wurden generische Behälterkonzepte, die sogenannten ENTRIA-Container (ENCON), auf der Grundlage der bei der Erstellung der Behälterdossiers gewonnenen Wissensbasis entwickelt, siehe auch die Diskussion ab Seite 27. Besonderes Augenmerk lag hierbei auf der behälterseitigen Schaffung optimaler Randbedingungen für eine potentielle Rückholung. Möglich wurde dies durch die Berücksichtigung der Ergebnisse beider Arbeitspakete, insbesondere bei der Konzeption der Lastanschlagpunkte, der Abschirmung der Behälter sowie der korrosionsreduzierenden Gestaltung

und dem Verschluss der Behälterhülle. Der interdisziplinäre Prozess der Entwicklung des ENCON-Konzeptes sowie die technischen Details der generischen, wirtsgesteinsspezifischen ENCON-Behälter können dem derzeit in Fertigstellung befindlichen ENCON-Arbeitsbericht und den Behälterdossiers entnommen werden (Hassel u. a., 2018).

1. Konzepte für Behälterertüchtigung, Behältermanipulation sowie den Behältertransport

Die Behälter übernehmen im zeitlichen Ablauf der Entsorgungsoptionen, von der Beladung über den Transport, die Zwischenlagerung, die Einlagerung im geologischen Tiefenlager bis hin zu einer potentiellen Rückholung oder Bergung, unterschiedliche Funktionen und besitzen einen großen Einfluss auf viele Aspekte der Handhabung der Behälter. Auf die Entstehung des generischen ENCON-Behälterkonzeptes wird im interdisziplinären Teil dieses Berichtes eingegangen. Weitere Details können dem ENTRIA-Arbeitsbericht zum Behälterkonzept entnommen werden. Nachfolgend wird daher ausschließlich der Einfluss betrachtet der sich aus dem Umgang mit den Behältern beziehungsweise aus der Behälterhandhabung während der unterschiedlichen Phasen der Entsorgungsoptionen auf die Anforderungen an die Behälter ergeben.

Die Zwischenlagerung der bereits angefallenen wärmeentwickelnden Abfälle stellt den derzeitigen Status Quo des Entsorgungsprozesses dar. Die Zwischenlagerung erfolgt derzeit in Transport- und Lagerbehältern (TLB), die in oberflächennahen Zwischenlagern und Lagerhallen verwahrt werden. Die Lagerung dieser Behälter erfolgt, gemäß dem Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit, in Deutschland derzeit dezentral, verteilt auf 20 Zwischenlagerstandorte (siehe hierzu BfE (2018)). Diese befinden sich zumeist an den Standorten der Leistungsreaktoren. Somit müssen die radioaktiven Reststoffe nach dem Abschluss der Phase der dezentralen Zwischenlagerung von den jetzigen Lagerstandorten abtransportiert werden.

2. Handhabung im Kontext der Lageroptionen

In Abhängigkeit vom gewählten Entsorgungspfad kann sich an die dezentrale Zwischenlagerung eine Phase der Langzeitzwischenlagerung an einem oder wenigen zentralen Standorten für einen Zeitraum von bis zu wenigen hundert Jahren anschließen. Durch die Zentralisierung der oberflächennahen Lagerung wird es möglich, an den Standorten umfangreiche Infrastruktureinrichtungen beispielsweise für die Wartung und Ertüchti-

gung der Lagerbehälter vorzuhalten. Auch eine „Heiße Zelle“, welche ein Umladen des Inventars ermöglicht, falls es zu irreparablen Schäden an einzelnen Behältern kommt, sollte an diesen Standorten errichtet werden. Auf Grund der für mehrere 100.000 Jahre anhaltenden Radiotoxizität des Inventars kann eine Langzeitzwischenlagerung jedoch keinen Endpunkt des Entsorgungspfades darstellen, auch wenn zum heutigen Zeitpunkt noch nicht abschließend geklärt werden kann, welcher Entsorgungspfad sich an diese Lagerung anschließen wird. Daher ist es, in Abhängigkeit von der potentiellen Lagerdauer, erforderlich die radioaktiven Abfälle in einer geeigneten Form zu konditionieren, um eine sichere Handhabbarkeit der eingeschlossenen Abfälle im Rahmen der Überführung in den anschließenden Entsorgungspfad, zum Beispiel bei der Konditionierung der Abfälle in geeignete Tiefenlagergebinde, zu gewährleisten.

Die Entsorgungsoption, die derzeit in Deutschland verfolgt wird, zeichnet sich dadurch aus, dass die Abfälle nach der dezentralen Zwischenlagerung zeitnah in das jeweils eine geologische Tiefenlager überführt werden. Bei der Umsetzung dieser Option ist davon auszugehen, dass das radioaktive Material in den derzeitigen Transport- und Lagerbehältern zu einer Rekonditionierungsanlage transportiert und dort noch kurzfristig im Eingangslager verwahrt wird. Im Anschluss muss das Inventar aus den TLB entnommen und in geeigneten Behältern zur Tiefenlagerung eingeschlossen werden. Nach einer kurzzeitigen Zwischenlagerung im Ausgangslager der Rekonditionierungsanlage werden die Tiefenlagerbehälter zum Lagerbergwerk transportiert. Nach der Eingangskontrolle und gegebenenfalls kurzer Pufferlagerung, werden die Behälter in das Tiefenlager verbracht. Dort werden sie in den Einlagerungsbereichen platziert, die direkt im Anschluss mit Versatzmaterial verfüllt werden. Dieser Zustand stellt im Normalfall, nach dem Verschluss der Infrastrukturstrecken des Tiefenlagers, den Endpunkt der Entsorgungsoption Tiefenlagerung dar.

Die aktuelle Gesetzeslage fordert allerdings auch, dass beispielsweise für den Fall einer unerwarteten Entwicklung des Tiefenlagers, über einen Zeitraum von bis zu 500 Jahren eine Bergung der Behälter möglich sein muss. Auch wird derzeit diskutiert, ob das Tiefenlager anschließend an den Einlagerungsbetrieb, noch für einen Zeitraum von einigen Jahrzehnten, für eine sogenannte Beobachtungsphase, offengehalten werden soll. Dies würde ein Monitoring des direkten Lagerumfeldes ermöglichen, das potentiell Informationen liefern kann, welches die Aussagegenauigkeit von Prognosen über die zukünftige Lagerentwicklung steigern würde. Sollten während dieser Beobachtungsphase Erkenntnisse gewonnen werden, welche darauf schließen lassen, dass die Endlagerung an diesem Standort nicht den optimalen Entsorgungspfad für das Inventar darstellt,

muss die Möglichkeit offen gehalten werden die eingelagerten Behälter zurück zu holen.

Die Umsetzung der genannten Entsorgungsoptionen erfordert somit viele Abläufe, die eine Handhabung der Behälter, und im Rahmen von Konditionierungsvorgängen auch des radioaktiven Inventars, erforderlich machen. Hierzu muss zuallererst die Handhabbarkeit sowohl der Behälter, als auch des Inventars über lange Zeiträume, über mehrere Jahrhunderte hinaus, gewährleistet sein. Grundvoraussetzung hierfür ist, die langfristige Gewährleistung der mechanischen Integrität von Behälter und Inventar. Wenn die Konditionierung in die Tiefenlager- oder Langzeitzwischenlagerbehälter bereits in den nächsten Jahrzehnten erfolgt, kann für diesen Vorgang noch davon ausgegangen werden, dass zumindest die mechanische Integrität des Behälterinventars, und hier insbesondere der strukturenbenden Brennstabhüllrohre, weitestgehend gewährleistet ist. Nach einer Lagerung über viele Jahrzehnte bis hin zu einigen Jahrhunderten, wie sie sich im Rahmen der Umkonditionierung nach einer langfristigen Oberflächenlagerung, oder nach der Rückholung oder Bergung der Reststoffe aus einem Tiefenlager ergibt, ist von einer zunehmenden Schädigung der Brennstabhüllrohre auszugehen. Eine Handhabung des Inventars zu diesem Zeitpunkt kann potentiell zu einem strukturellen Versagen der Brennstabhüllrohre führen (Ellinger u. a., 2010).

Sowohl bei der langfristigen Zwischenlagerung als auch bei der geologischen Tiefenlagerung ist davon auszugehen, dass die Notwendigkeit besteht, das Inventar auch nach längeren Zeiträumen aus den Lagerbehältern entnehmen zu können. Auch wenn diese Arbeiten in der kontrollierten Umgebung einer sogenannten „Heißen Zelle“ erfolgen, kann es bei der Handhabung strukturell geschädigter Brennelemente zu einer unerwünschten Freisetzung von Radionukliden und somit zu einer Kontamination des Arbeitsbereiches kommen. Durch eine langzeitstabile, innere Umschließung des Inventars kann diese Kontaminationsfreisetzung während Handhabungsvorgängen verhindert werden. Dieser Aspekt ist bei der Gestaltung der Lagerbehälter für alle Entsorgungsoptionen zu beachten.

Bei einer Handhabung des Inventars in der kontrollierten Umgebung einer „Heißen Zelle“ muss nur die mechanische Integrität des Materials gewahrt werden. Eine geringfügige Freisetzung von gas- oder staubförmigen Radionukliden ist hier zulässig. Im Gegensatz hierzu sind die Randbedingungen der Handhabung der beladenen Behälter wesentlich vielfältiger. So kann zum Beispiel ein Transport der Behälter auf öffentlichen Straßen erforderlich sein. Die Einlagerung der Behälter in das Zwischen- oder Tiefenlager findet weitestgehend unter bekannten, defi-

nierten Randbedingungen statt. Bei der Konzeption der Behälter und der Planung unterschiedlicher Lagerkonzepte sind allerdings auch die zu einem späteren Zeitpunkt potentiell erforderlichen Handhabungsvorgänge zu berücksichtigen. Die Randbedingungen dieser zukünftigen Vorgänge können heute allerdings noch nicht vollumfänglich beschrieben werden. Somit sind für eine sichere Handhabung insbesondere die Behälter so zu gestalten, dass sie unter den zu erwartenden Randbedingungen der Handhabung größtmögliche Sicherheit gewährleisten. Ohne exakte Kenntnis zukünftiger Entwicklungen, lässt sich ein hohes Maß an Sicherheit nur erzielen, indem die von dem in den Behältern eingeschlossenen Inventar ausgehenden Gefahren soweit möglich reduziert werden. Hierzu ist an erster Stelle die Freisetzung von Radionukliden zu vermeiden. Bei einer potentiellen Rückholung wird voraussichtlich eine Handhabungstechnik zum Einsatz kommen, die weitestgehend aus den Einlagerungsgeräten abgeleitet werden kann, beziehungsweise diesen entspricht. Im Gegensatz hierzu können die bei einer Bergung der Behälter zur Anwendungen kommenden Handhabungstechniken heute nicht eindeutig identifiziert werden.

Techniken zur Rückholung und Bergung eingelagerter Behälter aus dem Tiefenlager

Um die eingelagerten radioaktiven Abfälle aus dem Tiefenlager zu entfernen, müssen in einem ersten Schritt die verfüllten und verschlossenen Einlagerungsstrecken wieder geöffnet werden, um die Zugänglichkeit der Behälter, hier insbesondere der Tragstrukturen, wieder zu erlangen. Die Wiederauffahrung der verfüllten Einlagerungsstrecken erfolgt voraussichtlich weitestgehend fernhantiert mit Techniken des Bergbaus. Bereits diese Arbeiten können jedoch teilweise den Aufenthalt von Personen in der Nähe der Behälter erfordern. Zu diesem Zeitpunkt kann die Schädigung einzelner Behälter, welche beispielsweise auch während der Freilegung auftreten und zu einer Freisetzung von Radioaktivität führen kann, nicht ausgeschlossen werden. Entsprechend muss, wie in Abbildung 5.97 dargestellt, bereits vor dem Beginn der Arbeiten zur Freilegung der Behälter der betreffende Einlagerungsbereich vom restlichen Bergwerk beispielsweise durch eine Abmauerung abgetrennt und ein Kontrollbereich errichtet werden.

An die Freilegung anschließend muss eine Reinigung und Inspektion der Behälter erfolgen um deren Zustand eindeutig zu identifizieren und den dichten Einschluss des Inventars zu validieren, bevor weitere Arbeitsschritte, beispielsweise zur Handhabung, erfolgen können. Je nach Zu-

stand der Behälter muss gegebenenfalls im Anschluss eine Ertüchtigung der Behälter erfolgen. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf den in der Abbildung 5.91 dargestellten Lastanschlagpunkten der Behälter.



Abbildung 5.91: Lasttragende Strukturen der Behälter am Beispiel des ENCON S.

Erst nach der Durchführung dieser Arbeiten können die Behälter aufgenommen und aus den Einlagerungsstrecken entfernt werden. Um die Behälter sicher manipulieren zu können ist anzustreben, dass die Lastanschlagpunkte der Behälter so dauerhaft gestaltet werden, dass sie auch im Rahmen einer Bergung der Behälter nach 500 Jahren (BMU, 2010) verwendet werden können. Falls die Lastanschlagpunkte einzelner Behälter für die Manipulation nicht mehr geeignet sein sollten, existieren jedoch auch alternative Möglichkeiten zu Behälterhandhabung, die nachfolgend beschrieben werden.

Die Handhabung von Lagerbehältern entspricht grundsätzlich der Handhabung von anderen Großkomponenten. Für die eigentliche Manipulation der Behälter stehen etablierte Techniken aus anderen Anwendungsfeldern wie dem Anlagenbau zur Verfügung. Die Arbeiten müssen allerdings, dem Minimierungsgrundsatz folgend, zur Reduzierung der radiologischen Gefährdung der Mitarbeiter weitestgehend fernhantiert erfolgen.

Die für die Handhabung erforderlichen Komponenten und Geräte übernehmen unterschiedliche Funktionen im Handhabungsablauf und können dementsprechend in unterschiedliche Funktionsgruppen eingeteilt werden. Der Behälter selbst stellt mitsamt seinem Inhalt die zu transportierende Last dar. An ihm befinden sich Lastaufnahmepunkte, welche bei den ENCON-Behältern als Tragringe beziehungsweise Tragpilze ausgeführt sind. Zum Heben der Behälter muss zwischen den Lastaufnah-

mepunkten und den Tragmitteln der Handhabungs- oder Hebeeinrichtung mit geeigneten Anschlagmitteln und gegebenenfalls Lastaufnahmemitteln eine stabile Verbindung hergestellt werden. Die angehobene Last kann im Anschluss entweder direkt mit der Handhabungseinrichtung abtransportiert, oder mit der Hebevorrichtung auf einer geeigneten Transporteinrichtung abgelegt werden.

Auch wenn die Tiefenlagerbehälter selbstabschirmend gestaltet sind, verbleibt dennoch eine nicht zu vernachlässigende Oberflächendosis. Hieraus ergibt sich die Herausforderung, dass zwar ein kurzfristiger Aufenthalt in direkter Behälternahe möglich ist, die Aufenthaltsdauer von Personen in diesem Bereich jedoch auf ein Minimum reduziert werden sollte. Um auf unterschiedliche Situationen und Randbedingungen bei der Rückholung der Behälter reagieren zu können, ist es zielführend die Handhabungskomponenten des Rückholsystems aus mehreren Modulen zusammenzusetzen. Hierdurch kann auf variierende Anforderungen bei der Rückholung durch den Umbau einzelner Module reagiert werden. Die einzelnen Komponenten des Handhabungssystems können den drei Gruppen Transportmodul, Lastaufnahmemodul (behälter- sowie manipulatorseitig) sowie dem Hebe- beziehungsweise Manipulationsmodul zugeordnet werden.

Transportsysteme. Zum Transport von Lasten in der Größenordnung der Lagerbehälter können unterschiedliche Techniken zum Einsatz kommen. Die Auswahl der geeigneten Transporttechnik erfolgt unter Berücksichtigung des Untergrundes auf dem der Transport erfolgen muss sowie auf Grundlage weiterer Randbedingungen, die sich aus dem Lagerumfeld ergeben. Ein weiterer Einflussfaktor für die Auswahl der Transporttechnik ist die Entfernung, über die der Transport erfolgen soll. Die Bandbreite der für den Transport über längere Distanzen eingesetzten Technologien reicht von schienengeführten Transportsystemen bis hin zu radgeführten Transportplattformen. Radgeführte Transportsysteme bieten den Vorteil, dass sie, abgesehen von der Tragfähigkeit des Bodens, nur vergleichsweise geringe Anforderungen an die Transportwege stellen. Zusätzlich besitzen radgeführte Transportplattformen eine sehr hohe Manövrierfähigkeit. Wenn nur ein geringer Ausbau der Transportwege möglich ist, erfordert der Transport großer Lasten eine hohe Anzahl von Rädern bzw. Achsen an der Plattform, um das Gewicht auf eine ausreichend große Fläche zu verteilen. Der technologische Aufwand für die Konstruktion und insbesondere auch die Steuerung des Transportsystems ist bei radgeführten Transportsystemen hoch, die erzielbaren Transportgeschwindigkei-

ten liegen auf wenig ausgebauten Transportstrecken oft nur im Bereich weniger Meter pro Stunde.

Schienengebundene Transportmittel erfordern einen erheblich höheren Aufwand für die Transportinfrastruktur. Vor dem Transport müssen zuerst die Schienen und die zugehörige Leit- und Steuerungstechnik auf der Transportstrecke aufgebaut werden. Dadurch, dass die Last des Transportgutes durch die Gleise gleichmäßig in den Boden geleitet wird und die Gleise selber auch hohe Punktlasten zulassen, können die Transportplattformen bei diesen Systemen einfacher gestaltet werden. Zusätzlich übernehmen die Gleise die Aufgabe der Streckenführung, der Steuerungsaufwand für die einzelnen Transportmodule ist vergleichsweise gering, wodurch gegebenenfalls auch höhere Transportgeschwindigkeiten erzielt werden können. Schienengeführte Transportsysteme besitzen somit Vorteile für Transportstrecken auf denen wiederholt schwere Lasten transportiert werden sollen. Radgeführte Systeme sind im Gegensatz hierzu eher für Einzeltransportaufgaben geeignet.

Auf das Tiefenlager übertragen bietet sich die Anwendung radgeführter Systeme für den Transport der Behälter aus den kurzen Einlagerungstrecken heraus an. Für den Transport aus den Einlagerungsfeldern zur Schachtförderanlage kann es vorteilhaft sein, die Behälter auf ein schienengeführtes Transportsystem umzuladen. Dieses ermöglicht größere Transportgeschwindigkeiten und Takraten bei einem höheren Automatisierungsgrad. Die Infrastrukturstrecken auf denen diese Transporte erfolgen weisen den Vorteil auf, dass sie sich in ausreichender Entfernung von dem in den Lagerbereichen eingelagerten Inventar befinden. Beim Anlegen der für die Rückholung beziehungsweise Bergung erforderlichen Verkehrswege in den Infrastrukturstrecken ergibt sich demnach keine direkte radiologische Gefährdung des Personals. Auf Grund der vergleichsweise hohen Anzahl der auf dieser Strecke erforderlichen Transporte und den aus radiologischer Sicht guten Arbeitsbedingungen bietet ein weiterreichender Ausbau der Transportwege hier erhebliche Vorteile. Ein Ausbau mit Gleisen und einem Leitsystem für einen weitestgehend automatisierten Auslagerungsbetrieb stellt bezüglich der erzielbaren Transportkapazität den Maximalzustand des Ausbaus dar. Alternativ können, zum Beispiel wenn nur eine begrenzte Anzahl von Transporten auf einzelnen Strecken geplant ist, auch geringere Ausbaustände sinnvoll sein, welche sich bezüglich des erforderlichen Aufwandes zwischen den beiden Extremen befinden.

So können höher frequentierte Transportwege im Einlagerungsbereich mit einem ebenen, tragfähigen Belag ausgebaut werden. Die Steuerung der radbasierten Transportsysteme kann in diesen Bereichen über ein au-

tomatisiertes Leitsystem oder eine Führungsschiene erfolgen, wodurch Kollisionen mit den Tunnelwänden oder anderen Transportfahrzeugen ausgeschlossen werden können. Hierdurch lassen sich einzelne Vorteile des schienengeführten Systems für den fernhantierten Betrieb auch auf radbasierte Systemen übertragen. Das Umladen der Behälter auf ein anderes Transportsystem im beengten Umfeld des Einlagerungsbereiches wird hierdurch vermieden.

Bevor der Transport der Behälter erfolgen kann, müssen diese zuerst freigelegt, mittels eines geeigneten Aufnahmesystems gegriffen, angehoben und auf dem Transportsystem positioniert werden. Im Idealfall, wie bei einer Rückholung nach nur wenigen Jahren, kann diese Manipulation über Lastaufnahmemittel beziehungsweise Anschlagmittel an den hierfür vorgesehenen Lastanschlagpunkten an den Behältern erfolgen, ohne dass an diesen zuvor Arbeiten zur Ertüchtigung durchgeführt werden müssen.

Behälterhandhabung. Die ENCON-Behälter sind zur Handhabung mit Lastanschlagpunkten versehen, die gut zugänglich in der Nähe der Stirnflächen der Behälter positioniert sind und hierdurch vergleichsweise einfach freigelegt werden können. Gegebenenfalls kann während dieser Arbeiten das Gewicht im mittleren Bereich des Behälters gestützt werden. Im Anschluss können die Tragringe / Tragpilze von den mehrteilig verschraubten Aufnahmen des Traggestells umschlossen werden, welches als Lastaufnahmemittel für die nachfolgenden Manipulationsvorgänge dient. Die Aufnahmen des Traggestells müssen die Lastanschlagpunkte sicher umschließen, um die zur Manipulation erforderlichen Kräfte und Momente sicher auf den Behälter übertragen zu können. Da die Behälter aus Gründen der Stabilität sowie der Optimierung des Korrosionsverhaltens einen rotationssymmetrischen Aufbau besitzen, kann eine Verdrehung der Behälter im Traggestell durch einen reinen Formschluss nicht verhindert werden. Durch reibwerterhöhende Einlagen in den Lastaufnahmen des Traggestells und eine zusätzliche leichte Klemmung der Lastanschlagpunkte kann jedoch zusätzlich ein Kraftschluss erzeugt werden, der die Behälter auch in diesem Freiheitsgrad sicher fixiert. In der nachfolgenden Abbildung 5.92 ist eine solche Lastaufnahmeverrichtung dargestellt. Die Lastaufnahmen des Traggestells stellen über den resultierenden Form- und Kraftschluss eine sichere Aufnahme des Behälters dar. Das Traggestell selbst besitzt wiederum Aufnahmen, wie die in der nachfolgenden Abbildung dargestellten Tragzapfen, die als Schnittstelle zu den Manipulationssystemen und Transportsystemen dienen.

Findet die Handhabung der Behälter erst nach mehreren Jahrhunderten im Rahmen einer Bergung statt, können sich auf den Tragstrukturen

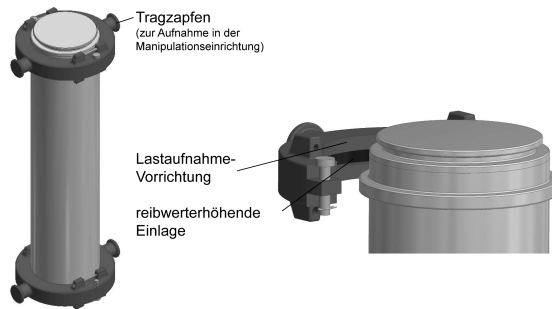


Abbildung 5.92: Einspannung des Behälters im Lastaufnahmemittel zur Manipulation des Behälters.

der Behälter, gegebenenfalls auch nur lokal, dickere Korrosionsschichten gebildet haben. Bereits wenn diese eine Stärke von wenigen Millimetern überschreiten, können die Tragstrukturen nicht ohne weitere Vorarbeiten zur Handhabung der Behälter genutzt werden. Die Festigkeit und somit die Tragfähigkeit der Korrosionsschichten liegt in der Regel weit unter der des Grundmaterials der Behälter. Bei der Manipulation der Behälter kann es demzufolge zu einem Abplatzen der Oberfläche und damit einhergehend zu einer dynamischen Verlagerung der Last kommen. Durch die hierbei auftretenden Beschleunigungskräfte können die Manipulatoren überlastet oder geschädigt werden.

Um dies zu verhindern, ist die Dicke und Stabilität der Korrosionsschichten, die sich auf den Tragstrukturen gebildet haben, mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren, wie beispielsweise der Wirbelstromprüfung, zu bestimmen. Gegebenenfalls müssen die Korrosionsschichten vor einer Handhabung der Behälter entfernt werden. Allerdings führen gegebenenfalls auch dünne, statisch irrelevante, Korrosionsschichten, die sich bereits nach wenigen Jahren an der Oberfläche der Tragstrukturen bilden können, zu Problemen bei der Handhabung der Behälter, die eine Ertüchtigung der Tragstrukturen erforderlich machen.

Insbesondere bei Behältern aus Eisenwerkstoffen kann die Bildung einer oberflächlichen Korrosionsschicht nicht vermieden werden. Hierdurch erhöht sich die Rauheit der Oberflächen, und es kann zu einem verstärkten Anhaften von Versatzmaterial kommen. Insbesondere der als Versatzmaterial im Steinsalz zum Einsatz kommende Salzgrus kann durch seine Neigung zum plastischen Fließen zu sehr festen Anhaftungen an der Behälteroberfläche führen. Diese Anhaftungen können das

sichere Greifen der Behälter verhindern und müssen daher mechanisch, zum Beispiel durch Abfräsen, Nadeln oder Abbürsten, entfernt werden.

Techniken zur in-situ-Ertüchtigung der Behälter und zur Behältermanipulation. Um die Ertüchtigung der Behälter durch das mechanische Entfernen nicht tragfähiger Oberflächenschichten oder Anhaftungen zu ermöglichen, weisen die Behälter im Bereich der Tragstrukturen eine hohe Materialstärke auf. Hierdurch können mehrere Millimeter bis hin zu einigen Zentimetern Material von der Oberfläche abgetragen werden, ohne dass es zu einer unzulässigen Reduktion der Tragfähigkeit der Strukturen kommt. Der zur Ertüchtigung der Lastanschlagpunkte erforderliche Abtrag von Korrosionsschichten, sowie fest anhaftenden Versatzmaterials, kann nach dem heutigen Stand der Technik mittels spanender Verfahren, wie Fräsen, erfolgen. Geeignete technische Systeme zur in-situ-Fräsbearbeitung von Großkomponenten sind bereits heute auf dem Markt verfügbar. Sie werden beispielsweise zur Schweißstoßvorbereitung im Pipelinebau eingesetzt. Diese Systeme sind so gestaltet dass sie, wie in Abbildung 5.93 dargestellt, am zu bearbeitenden Bauteil positioniert und falls erforderlich auch direkt an diesem verankert werden können. Die Bearbeitung des Bauteils erfolgt mit elektromechanisch oder hydraulisch angetriebenen Werkzeugen, wie den beiden rechts und links des Bauteils ersichtlichen Drehmeißeln. Um die Ertüchtigung der Lastanschlagpunk-



Abbildung 5.93: Werkzeug für die spanende in-situ-Bearbeitung von Rohrleitungen (Quelle: <http://www.protem-gmbh.de/produkte/nach-anwendung/rohre-und-pipelines-bearbeiten>; Protém GmbH Dettenheim; zuletzt abgerufen 20.02.2018).

te in der Einlagerungsstrecke, durchführen zu können, muss ihre Zugänglichkeit hergestellt und der teilweise freigelegte Behälter während der Bearbeitung sicher gestützt werden. Somit sind zur Ertüchtigung der Lastanschlagpunkte, neben der Technik zur mechanischen Bearbeitung, auch

Techniken erforderlich, mit denen die Behälter während und nach der teilweisen bergmännischen Freilegung und der Ertüchtigung sicher gestützt werden können. Das Gewicht der Behälter kann hierbei etwa über Stützen oder temporäre Haltesysteme abgefangen werden.

In Abhängigkeit vom Rückhol- bzw. Bergungskonzept können die für die Ertüchtigung erforderlichen temporären Stütz- und Haltesysteme bereits ein Bestandteil des Traggestells sein, das später auch für den Transport des Behälters Anwendung findet. Alternativ können sie auch eine eigenständige Komponente des Rückholsystems bilden oder in das Ertüchtigungswerkzeug integriert werden. Die finale Ausgestaltung dieses Aspektes ist hauptsächlich von den direkten Randbedingungen der Rückholung, der gewählten Konzeption der Einlagerungsstrecke, sowie dem Zustand der Behälter zum Zeitpunkt der Rückholung abhängig. Aus diesem Grund kann bezüglich dieses Aspektes keine Entscheidung auf der Grundlage generischer Lager- und Behälterkonzepte getroffen werden.

Wichtiger als die Bauweise des Gerüsts der temporären Haltesysteme ist allerdings die Funktionsweise der Aktoren zum Stützen der Behälter. Für diese Aktoren gelten ähnliche Anforderungen wie für die später zur Manipulation der Behälter erforderlichen Hebesysteme. Sie müssen das Behältergewicht in der Größenordnung von etwa 65 Tonnen und die hieraus resultierenden statischen und gegebenenfalls dynamischen Lasten sicher aufnehmen und in das Traggerüst ableiten. Allerdings ergibt sich für die Haltesysteme der Unterschied, dass mit diesen nur kleine Manipulationen der Behälter erfolgen müssen. Auch die Anforderungen an die Bewegungsgeschwindigkeiten dieser Manipulatoren sind sehr gering, sodass hier Verfahren zum Einsatz kommen können, welche durch eine große Untersetzung die zur Manipulation erforderlichen Kräfte mit vergleichsweise klein bauenden Antrieben erzeugen können. Die Behälter müssen nur soweit angehoben werden, dass der unter ihnen befindliche Sockel aus Versatzmaterial entlastet und das Gewicht der Behälter vollständig vom Haltesystem aufgenommen wird.

Da die Lastanschlagpunkte für die Ertüchtigung zugänglich sein müssen, kann eine Krafteinleitung in den Behälter zu diesem Zeitpunkt nur über einen Form- oder Kraftschluss mit dem eigentlichen Behälterkörper erfolgen. Bei den Aktoren mit denen der Form- oder Kraftschluss zwischen Behälter und Haltesystem hergestellt wird, kann es sich beispielsweise um Hydraulikzylinder oder um mechanische Spindeltriebe handeln. Weiterer Gestaltungsfreiraum ergibt sich aus der Option, die Funktionen Heben (Aktorik) und Halten (Stützen) auf unterschiedliche Systeme aufzuteilen. So können die Behälter auch mit Hilfe von Tragkissen oder auch Gurten gehoben werden, welche durch kleine Bohrungen unter dem Be-

hälter durchgeführt werden. Nach dem Heben der Behälter und dem fernhantierten Entfernen überschüssigen Versatzmaterials können mechanischen Tragarme oder anderen statischen Aufnahmen unter den Behälter geschoben oder geschwenkt und der Behälter für die Ertüchtigung auf diesen abgelegt werden.

Auch wenn mit den Aktoren des Haltesystems nur kurzhubige Hebevorgänge an den Behälter erfolgen, sind diese dennoch in jedem Fall „Fail-Safe“ auszulegen, um eine ungeplante dynamische Verlagerungen der Behälter zu vermeiden. Der hergestellte Kraftschluss zwischen Behälter und Haltesystem darf nicht, zum Beispiel durch eine Unterbrechung der Energieversorgung, unkontrolliert gelöst werden. Anders als Spindeltriebe, welche durch eine geeignete Auslegung selbsthemmend gestaltet werden können, müssen hydraulische oder pneumatische Aktoren demnach entweder als federbelastete Varianten Anwendung finden oder mit zusätzlichen, mechanischen Sicherungen kombiniert werden. Somit werden die Behälter so gestützt, dass die Freilegung und Bearbeitung der Tragstrukturen sicher erfolgen kann.

Nach der Ertüchtigung der lasttragenden Strukturen der Behälter sind diese wieder vollumfänglich für nachfolgende, fernhantierte Manipulationsvorgänge nutzbar. Die Behälter können vom Manipulationssystem über geeignete Lastaufnahmemittel an den Tragringen / Tragpilzen aufgenommen werden. Hierdurch wird eine sichere Verbindung mit dem Manipulations- beziehungsweise Transportsystem ermöglicht. Sobald das Gewicht des Behälters vollständig vom Handhabungssystem getragen wird, können die zuvor verwendeten temporären Haltesysteme gelöst und das gegebenenfalls noch im mittleren Behälterbereich verbliebene Versatzmaterial maschinell entfernt werden. Erst jetzt kann der Behälter aus der Einlagerungsstrecke abtransportiert und hierfür auf der zuvor beschriebenen, radgeführten Transportplattform platziert und sicher auf dieser verankert werden. Die Verankerung des Behälters auf der Transportplattform ist zwingend erforderlich, um die Sicherheit der Behälter und des eingeschlossenen Inventars während des Transports zu gewährleisten. Prinzipiell ergeben sich mehrere Möglichkeiten wie die erforderliche Verankerung der Behälter an der Transportplattform erfolgen kann.

Die erste Variante stellt die direkte Verankerung des Handhabungssystems, mit dem in ihm befestigten Behälter, an der Transportplattform dar. In diesem Fall wird das Handhabungssystem zusammen mit dem Behälter angehoben und die Transportplattform unter Behälter und Handhabungssystem platziert. Nun können diese Komponenten miteinander gekoppelt werden. Hierfür können beispielsweise die in der Abbildung 5.94 dargestellten Twist-Lock Kupplungen zum Einsatz kommen, welche einen eta-

blierten Standard darstellen und unter anderem im Containerumschlag Anwendung finden.

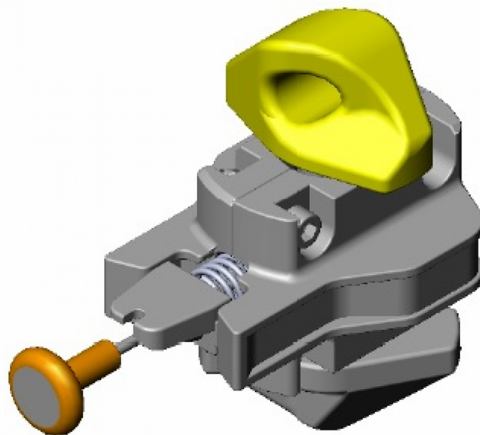


Abbildung 5.94: Aufbau einer Twist-Lock-Kupplung (Quelle: <http://www.globuscontainer.com/pub/index.php/de/constructions/container-parts/twist-locks/item/25-semi-automat-twist-lock-tw103>; Globus Container Thessaloniki; zuletzt abgerufen 21.02.2018).

Diese Kupplungen ermöglichen das automatisierte, formschlüssige Verbinden von Komponenten, des Weiteren gestatten sie über einen vorgespannten Formschluss die Übertragung hoher Kräfte. Im Anschluss kann der Behälter mitsamt dem Handhabungssystem aus der Einlagerungsstrecke herausgefahren werden. Die zweite Variante der Kopplung von Behälter und Transportplattform ist die direkte Verankerung des Behälters auf der Transportplattform. Hierfür kann ein Formschluss zwischen dem zylindrischen Behälterkörper und einer, an die Form des Behälters angepassten, Aufnahme auf der Transportplattform erzeugt werden. Ein sehr ähnliches Konzept wird beim in den nachfolgenden Abbildungen dargestellten Handhabungskonzept verfolgt, welches für das deutsche POL-LUX®-Konzept entwickelt worden ist. In Abbildung 5.95 ist beispielhaft ein schienengeführter Transportwagen zur formschlüssigen Aufnahme von Tiefenlagerbehältern dargestellt.



Abbildung 5.95: Schienengeführter Transportwagen für POLLUX®-Behälter (DBETech, Siemag Tecberg) .

Zum Abtransport der Behälter müssen diese im ersten Schritt mit dem Handhabungssystem angehoben werden, um die Transportplattform unter dem Behälter platzieren zu können. Hierzu muss das Handhabungssystem so gestaltet sein, dass es im Rahmen der Freilegung über dem Behälter positioniert werden kann und nach dem Heben des Behälters das Unterfahren mit der Transportplattform ermöglicht. Um den Abtransport der mit dem Behälter beladenen Plattform zu gestatten, ist das Handhabungssystem auf den Stirnseiten offen zu gestalten, damit eine problemlose Ausfahrt des Behälters möglich ist. Diese Anforderungen können durch den Aufbau der Handhabungsvorrichtung als Portalanlage erfüllt werden. Als Beispiel für die praktische Umsetzung einer solchen Anlage ist in der Abbildung 5.96 das Handhabungsgerät für die Einlagerung von POLLUX®-Behältern dargestellt.

Da die ENCON-Tiefenlagerbehälter, anders als der POLLUX®, vollständig rotationssymmetrisch gestaltet sind, kann eine Verschiebung beziehungsweise Verdrehung der Behälter auf der Tragplattform durch den reinen Formschluss nicht sicher ausgeschlossen werden. Durch die Ausstattung der Behälterauflagen mit reibwerterhöhenden Auflagen ergibt sich durch das Eigengewicht der Behälter ein leichter Kraftschluss. Durch zusätzliche Spannbänder oder Klemmbügel, die über den Behälter gelegt und an der Transportplattform verspannt werden, wird der Behälter abschließend auf die Aufnahmen niedergezurrt. Hierdurch wird die per Reibung übertragbare Kraft zwischen Behälter und Plattform weiter gesteigert, so dass hierüber auch hohe dynamische Belastungen aufgenommen werden können.



Abbildung 5.96: Handhabungsgerät für POLLUX®-Behälter (Quelle: <https://www.dbe-technology.de/ueberuns/aktuelles/d/aktualisierung-des-deutschen-safeguards-konzeptes-fuer-verschiedene-wirtsgesteine/>; DBE Technology GmbH Peine, zuletzt abgerufen 20.02.2018).

Der Vorgang der Behälterrückholung an einem Ausführungsbeispiel. Auch wenn die finale Auswahl der für die Rückholung der Behälter aus dem Tiefenlager eingesetzten Manipulations- und Transporttechniken immer aufgrund der konkreten Randbedingungen der Rückholung erfolgen muss, soll dennoch abschließend an einem Beispiel ein Rückholablauf und die hierfür verwendeten Komponenten beschrieben werden, die bezüglich der erforderlichen Handhabungsaktionen der Behälter optimiert wurde. Dieses Beispiel beschreibt die Rückholung von Tiefenlagerbehältern nach wenigen Jahrzehnten, welche nur leichte Korrosionsschäden an den Lastaufnahmepunkten aufweisen. Aus geotechnischer Sicht wird hier davon ausgegangen, dass die Stabilität des die Einlagerungsstrecke umgebenden Wirtsgesteins beziehungsweise des zuvor eingebrachten Streckenausbaus noch weitestgehend gegeben ist, so dass keine massiven Sicherungsmaßnahmen in der Einlagerungsstrecke im Rahmen der Wiederauffahrung erforderlich sind.

Wenn das Risiko besteht, dass sich kleinere Teile von der Decke der Einlagerungsstrecke lösen, kann zum Schutz des Arbeitsbereiches während der Behälterfreilegung ein mobiler Schild, beispielsweise in Form eines Stahlbogens, zum Einsatz kommen. In einem ersten Schritt wird der Arbeitsbereich vom restlichen Lager abgetrennt und ein Kontrollbereich

eingerrichtet. Nun wird, wie in Abbildung 5.97 ersichtlich, das Versatzmaterial, von der Stirnseite der Lagerbehälter ausgehend, um den Behälter herum aus der Einlagerungsstrecke entfernt und der Boden der Strecke seitlich soweit bearbeitet, dass ein tragfähiger Untergrund entsteht, welcher mit einem radgeführten Rückholgerät befahren werden kann. Der Lagerbehälter selbst wird in diesem Schritt noch nicht vollständig freigelegt. Er verbleibt auf der Streckensohle beziehungsweise einem Sockel aus Versatzmaterial in der Mitte der Einlagerungsstrecke. Je nach Tragfähigkeit des Versatzmaterials unter dem Behälter kann dieser entweder direkt über seine komplette Länge oder falls mit einem Absacken des Behälters gerechnet werden muss, zuerst nur eine teilweise, einseitig freigelegt werden.

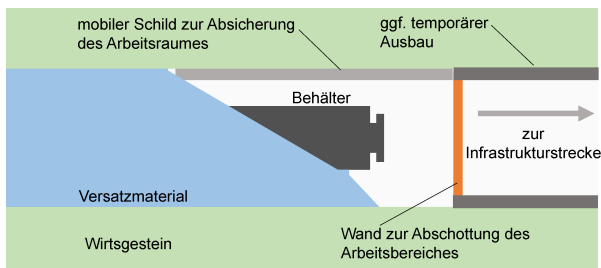


Abbildung 5.97: Einseitig freigelegter Behälter in einer Einlagerungsstrecke.

Für die Ertüchtigung und die Auslagerung der Behälter aus der Einlagerungsstrecke kommt in diesem Beispiel ein kombiniertes Rückholgerät auf der Grundlage eines radgeführten Transportsystems zum Einsatz. Dieses umfasst ein temporäres Hebe- und Stützsystem, sowie einen Werkzeugträger für die Arbeiten zur Ertüchtigung der Behälter und das eigentliche Handhabungssystem für die Manipulation des Behälters. Das Rückholgerät kann nach der teilweisen Freilegung des Behälters über diesem positioniert werden. Nun kann der Behälter mit den Haltevorrichtungen gegriffen, gestützt und im Anschluss gegebenenfalls weiter freigelegt werden. Nach der Untersuchung, Reinigung und falls erforderlich, der Ertüchtigung der Tragstrukturen, kann der Behälter mit der Hauptmanipulationsvorrichtung des Rückholgerätes angehoben und fest mit dem Transportsystem verbunden werden. Nun kann gegebenenfalls verbliebenes Versatzmaterial unter den Behältern entfernt, und der Behälter aus der Einlagerungsstrecke abtransportiert werden.

Das radgeführte Rückholgerät weist auf Grund der Vielzahl der integrierten Funktionen eine hohe Komplexität, große Abmessungen und ein hohes Gewicht auf. Somit ist es wenig sinnvoll, den Behälter mit dem eigentlichen Rückholgerät über weite Strecken zu transportieren. Aus diesem Grund wird der Behälter im Infrastrukturbereich des Tiefenlagers auf einen schienengeführten Transportwagen umgeladen, mit dem der Abtransport des Behälters aus dem Tiefenlager in ein oberflächennahes Zwischenlager erfolgen kann.

5.6.4 Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik - Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik (LfDG)

**Einfluss einer Monitoringsohle auf das Langzeitverhalten eines
verschlossenen Tiefenlager- / Endlagersystems im Salinar- oder
Tonsteingebirge**

Globalmodelle für ein generisches Referenz-Tiefenlager- / Endlagersystem mit Monitoringsohle. Im Rahmen des ENTRIA-Teilprojektes VP 6.7mod sind analog zu den in den ENTRIA-Teilprojekten VP 5.1 und VP 5.2 durchgeführten Arbeiten nunmehr Untersuchungen zum Einfluss einer Monitoringsohle auf das Langzeitverhalten eines verschlossenen Tiefenlager- / Endlagersystems im Salinar- oder Tonsteingebirge durchgeführt worden. Dabei stehen ebenfalls die fluiddynamischen Prozesse im Vordergrund, die innerhalb eines verschlossenen zweisöhligen Tiefenlager- / Endlagerbergwerks sowie in der umgebenden Wirtsgesteinsformation zu erwarten sind und zwar ebenfalls für die beiden Wirtsgesteinsformationen Salinargebirge und Tonsteingebirge. Einlagerungssohle und Monitoringsohle sind dabei durch Monitoringbohrlöcher miteinander verbunden. Anhand der in VP 6.7mod erhaltenen numerischen Simulationsergebnisse können eine vergleichende Betrachtung mit den in VP 5.1 und VP 5.2 erhaltenen numerischen Simulationsergebnissen erfolgen sowie die Auswirkungen der Monitoringsohle auf die zeitnah zur Abfalleinlagerung und auch längerfristig ablaufenden fluiddynamischen Prozesse ermittelt werden.

Das im Rahmen der in VP 6.7mod durchgeführten numerischen Simulationen verwendete generische zweisöhlige Referenz-Tiefenlager- / Endlagersystem besteht aus der in einer Teufe von 600 m positionierten Einlagerungssohle und einer Monitoringsohle, die im Salinargebirge sowie in dem an norddeutsche Verhältnisse angelehnten Tonsteingebirge in einem Abstand von 40 m und in dem an süddeutsche Verhältnisse angelehnten Tonsteingebirge in einem Abstand von 20 m oberhalb der Einla-

gerungssohle angeordnet ist. Von der Monitoringsohle aus sind Monitoringbohrlöcher in die Einlagerungssohle geteuft. Um den für das Monitoring zusätzlich benötigten Hohlraumbedarf und damit die Perforation der Wirtsgesteinsinformation zu minimieren, sind bei dem in VP 6.7mod verwendeten Berechnungsmodell die über den Einlagerungsfeldern angeordneten Monitoringstrecken orthogonal zu den jeweils zugehörigen Einlagerungsstrecken ausgerichtet.

Abbildung 5.98 zeigt eine Gesamtansicht des Globalmodells mit Anordnung der Monitoringsohle oberhalb der Einlagerungssohle sowie der von der Monitoringsohle in die Einlagerungssohle abgeteuften Monitoringbohrlöcher. Abbildung 5.99 zeigt eine zugehörige Detailansicht für den Bereich der Einlagerungsfelder.

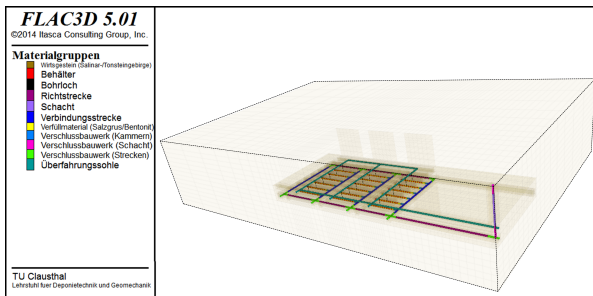


Abbildung 5.98: Gesamtansicht des Globalmodells mit Monitoringsohle und Monitoringbohrlöchern für eine generische HAW-Entsorgungsanlage im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge.

Simulation der Bau- und Betriebsphase

Um die Rand- und Anfangsbedingungen für die längerfristig ablaufenden Prozesse nach Verschluss der Einlagerungssohle grundsätzlich zutreffend zu erfassen, werden auch bei der zweisöhligen Bergwerkskonfiguration die Auffahrungsphase und die Ablagerungsphase explizit in grober raum- und zeitbezogener Abstraktion in die rechnerische Simulation implementiert.

Analog zu den für das einsöhlige Referenz-Endlagersystem durchgeführten Simulationen wird im Rahmen der rechnerischen Simulation auch des zweisöhligen Referenz-Tiefenlager- / Endlagersystems mit Monitoringsohle zunächst der Schacht abgeteuft. Im Anschluss wird dann allerdings zunächst die Monitoringsohle aufgefahren, um auf diese Weise eine erste untertägige Erkundung des Wirtsgesteins zu ermöglichen,

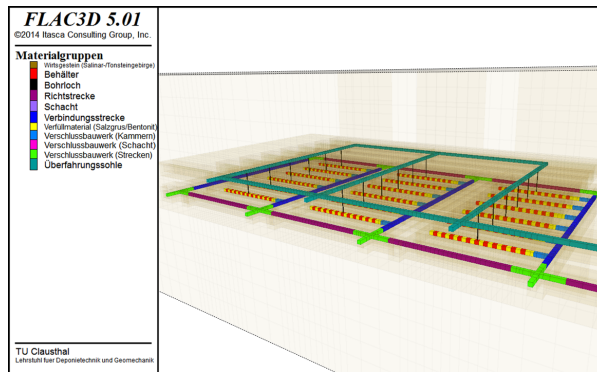


Abbildung 5.99: Detailansicht des Einlagerungsbereichs im Globalmodell mit Monitoringsohle und Monitoringbohrlöchern für eine generische HAW-Entsorgungsanlage im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge (Lage der Monitoringstrecken perspektivisch verzerrt).

bevor dann analog zum einsöhligen Referenz-Endlagersystem nach und nach die Auffahrung der Einlagerungssohle erfolgt. Auch hier wird angenommen, dass die Auffahrung einer neuen Einlagerungsstrecke sowie die Abfallbehältereinlagerung und der Versatz einer vorherigen Einlagerungsstrecke abwechselnd erfolgen, allerdings mit dem entscheidenden Unterschied, dass vor der Abfalleinlagerung in einer Einlagerungsstrecke zunächst das jeweilige Monitoringbohrloch aus der Monitoringsohle in diese Einlagerungsstrecke abgeteuft wird. Infrastrukturbereiche werden nicht berücksichtigt.

Nach Ende des Einlagerungsbetriebes wird ebenso wie im einsöhligen Referenz-Endlagersystem die restliche Einlagerungssohle zusammen mit dem unteren Bereich des Schachtes bis zur Monitoringsohle versetzt. Der weitere Schacht und die Monitoringsohle bleiben zunächst für den vorgesehenen Zeitraum des Monitorings weiterhin offen. Die Monitoringbohrlöcher bleiben ebenfalls unversetzt, um den Austausch / Ersatz defekter Messinstrumente zu ermöglichen, werden allerdings zum Schutz vor potentieller Direktstrahlung mit einer mit geringem Aufwand zu öffnenden Verschlusskonstruktion abgedeckt. Grundsätzlich wäre bei Bedarf auch das Abteufen weiterer Monitoringbohrlöcher möglich. Nach Ende der Monitoringphase werden dann in den rechnerischen Simulationen die Monitoringbohrlöcher, die Monitoringsohle und der restliche Schacht ebenfalls versetzt sowie mit Verschlussbauwerken versehen.

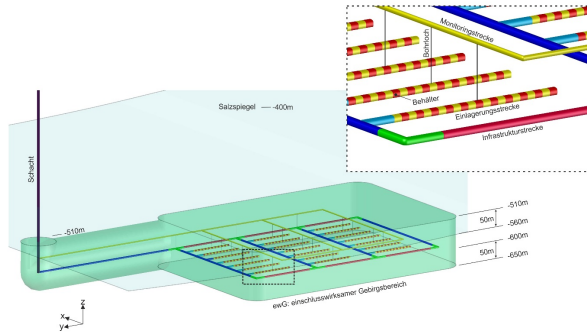


Abbildung 5.100: Exemplarische Darstellung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für ein Tiefenlager- / Endlagerbergwerkssystem mit Monitoringsohle.

Abbildung 5.100 zeigt zur Illustration die hier vorgegebene Konfiguration der Entsorgungsanlage mit einem exemplarisch zugeordneten einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Für den hier eingetragenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich sind die sicherheitstechnischen Vorgaben aus BMU (2010) einzuhalten. Dieser Ansatz gilt im Grundsatz gleichermaßen sowohl für das Tonsteingebirge wie auch für das Salinargebirge. Da die Monitoringsohle in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich integriert ist, sind durch das längerfristige Monitoring keine nach außen wirksamen Schwächungen der geologischen Barriere zu erwarten. Allerdings steigt der Platzbedarf. Dieser zunächst hypothetisch formulierte Ansatz ist allerdings noch durch umfassende generische Analysen zu unterlegen.

Bereits in Lux u. a. (2017a,b,c) sind exemplarisch ausgewählte Simulationsergebnisse im Hinblick auf den Einfluss einer Monitoringsohle auf das Langzeitverhalten eines verschlossenen Tiefenlager- / Endlagersystems im Salinar- oder Tonsteingebirge diskutiert worden. Eine detailliertere Darstellung der Simulationsergebnisse ist in Lux u. a. (2017d) zu finden. An dieser Stelle erfolgt daher lediglich eine zusammenfassende Betrachtung der wesentlichen Simulationsergebnisse, fokussiert auf signifikante Unterschiede hinsichtlich der fluiddynamischen Systementwicklung des einsöhligen Referenz-Endlagersystems und des zweisöhligen Referenz-Tiefenlager- / Endlagersystems.

Während der Monitoringphase können die hier illustrierten fluid-dynamischen Zustandsgrößen in ihrer räumlich-zeitlichen Entwicklung grundsätzlich auch als Monitoringparameter herangezogen werden. Weiterhin ist anzumerken, dass hier zunächst die im Tiefenlager / Endlager ablaufenden Zweiphasenflussprozesse analysiert werden, um ein grundsätzliches Prozess- und Systemverständnis aufzubauen. Die jeweiligen Zahlenwerte werden vorerst nur im Hinblick auf Massenbilanzen ausgewertet, nicht aber im Hinblick auf ihre sicherheitstechnische Relevanz.

Ausgewählte Simulationsergebnisse der Basis-Simulation zum Referenz-Tiefenlager- / Endlagersystem mit Monitoringsohle

Temperamentwicklung im Bereich der Monitoringsohle im Salinargebirge und im Tonsteingebirge. Ein wesentlicher Parameter für die konfigurative Ausgestaltung des Tiefenlager- / Endlagersystems mit Monitoringsohle ist der erforderliche bzw. standortbezogen mögliche Abstand zwischen Einlagerungssohle und Überwachungssohle. Dieser Abstand hat insbesondere Einfluss auf den zusätzlichen Raumbedarf des Entsorgungsbergwerks und damit auf die vertikale, möglicherweise auch laterale Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches. Er wird bedingt einerseits durch eine aus Gründen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes vorzunehmende Begrenzung der im Bereich der Monitoringsohle infolge der Zerfallswärmeentwicklung auf der Einlagerungssohle zu erwartenden erhöhten Gebirgstemperaturen, hat andererseits aber auch Einfluss auf die induzierte zusätzliche mechanische Beanspruchung des Barrierengebirges. Um Temperaturgrenzwerte einzuhalten, könnte sich aus der Anordnung einer Monitoringsohle auch das Erfordernis einer konfigurativen Umgestaltung der Einlagerungssohle ergeben, z. B. hinsichtlich des Abstandes der Einlagerungsstrecken oder der Belegungsdichte. Grundsätzlich sollte ein Abstand gewählt werden, der thermisch und auch thermomechanisch verträglich ist, der zu keinen signifikanten gegenseitigen Wechselwirkungen in der mechanischen Beanspruchung zwischen Einlagerungs- und Monitoringsohle während der Offenhaltungszeit der Monitoringsohle führt und der auch so groß ist, dass bis zum geohydraulisch wirksamen Verschluss der Monitoringsohle planmäßig kein Radionuklidtransport bis zur Monitoringsohle zu erwarten ist. Damit ist ein als zusätzliches Risiko anzusehender Radionuklidtransport über das vormalige Streckensystem auf der Monitoringsohle konzeptionell ausgeschlossen.

Wie bereits in (Lux u. a., 2017c,d) ausgeführt, hat die Monitoringsohle im Salinargebirge sowie im Tonsteingebirge keinen signifikanten Ein-

fluss auf die Temperaturentwicklung im Tiefenlager- / Endlagersystem. Nur in lokal eng begrenzten Bereichen um die Monitoringstrecken und -bohrlöcher werden für das zweisöhlige Tiefenlager- / Endlagersystem infolge der Bewetterung der Monitoringsohle geringfügig niedrigere Gesteinstemperaturen ausgewiesen als für das einsöhlige Endlagersystem. Hervorzuheben ist, dass in der Monitoringsohle des Referenz-Tiefenlager- / Endlagersystems im Salinargebirge die nach KlimaBergV (1983) zulässigen Temperaturgrenzwerte von $T = 52\text{ °C}$ nicht überschritten werden. Ohne Berücksichtigung der Bewetterung werden in den numerischen Simulationen im Tonsteingebirge bei einer Wirtsgesteinsmächtigkeit von 400 m in der Monitoringsohle des Referenz-Tiefenlager- / Endlagersystems etwa 300 Jahre nach Verschluss der Einlagerungssohle Maximaltemperaturen von $T = 33\text{ °C}$ erreicht, bei einer Wirtsgesteinsmächtigkeit von 100 m etwa 80 Jahre nach Verschluss der Einlagerungssohle Maximaltemperaturen von $T = 36\text{ °C}$. In beiden Fällen werden die zulässigen Temperaturgrenzwerte somit temporär lokal überschritten. Nach KlimaBergV (1983) sind im Tonsteingebirge Effektivtemperaturen – definiert als in Abhängigkeit von der Trockentemperatur, der Feuchttemperatur und der Wettergeschwindigkeit ermittelter Klimawert – von bis zu 30 °C zulässig.

Im Einzelfall dürfen Personen unter bestimmten Bedingungen insbesondere hinsichtlich der Arbeitszeit bis zu einer Effektivtemperatur von 32 °C beschäftigt werden. Zudem kann die zuständige Behörde entsprechend KlimaBergV (1983) in Einzelfällen Ausnahmen zulassen, wenn durch besondere Einrichtungen sichergestellt ist, dass für den einzelnen Beschäftigten die Klimabelastung in ihrer physiologischen Gesamtwirkung nicht so groß ist wie bei einer Effektivtemperatur von mehr als 30 °C . Bei einem Tiefenlager- / Endlagersystem im Tonsteingebirge könnten allerdings dennoch aus Gründen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes zusätzliche Maßnahmen erforderlich werden – entweder planerisch durch konfigurative Maßnahmen auf der Einlagerungssohle oder betriebstechnisch z. B. durch Kühlung der Wetter.

Fluiddynamische Prozesse im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge: Monitoringphase. Die aus den mit dem FTK-Simulator (vgl. Abs. 5.5.1) durchgeführten rechnerischen Simulationen erhaltenen Ergebnisse zu den in der Monitoringphase im zweisöhligen Referenz-Tiefenlager- / Endlagersystem ablaufenden fluiddynamischen Prozessen unterscheiden sich sowohl für die Wirtsgesteinsinformation Salinargebirge wie auch für die Wirtsgesteinsinformation Tonsteingebirge nur marginal von den im einsöhligen Referenz-Endlagersystem im gleichen Zeitraum ablaufenden fluiddyna-

mischen Prozessen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Monitoring-bohrlöcher im zweisöhligen System in dieser Phase als mit einem beweglichen Deckelsystem verschlossen angenommen werden, wodurch eine Wechselwirkung zwischen der Einlagerungssohle und der Monitoringsohle weitgehend unterbunden wird.

Im Rahmen der numerischen Untersuchung des Tiefenlager- / Endlagersystemverhaltens mit Hilfe des FTK-Simulators ist für verschiedene Beobachtungspunkte im Grubengebäude und in der umgebenden Wirtsgesteinsinformation die zeitliche Entwicklung unterschiedlicher fluiddynamisch relevanter physikalischer Zustandsgrößen (z. B. Porendruck, Sättigungsgrad, Temperatur) dargestellt und analysiert worden. Die Position der gewählten Beobachtungspunkte ist in Abbildung 5.101 dargestellt.

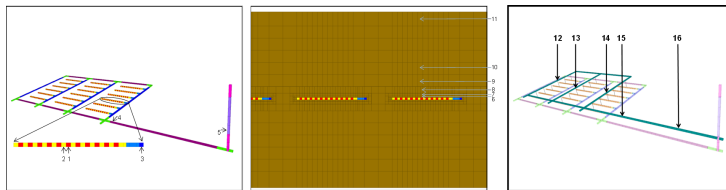


Abbildung 5.101: Position der Beobachtungspunkte zur Analyse der zeitabhängigen Entwicklung fluiddynamisch relevanter physikalischer Zustandsgrößen (links: Einlagerungssohle, mittig: Wirtsgesteinsinformation, rechts: Überwachungssohle).

Der signifikanteste Unterschied zwischen dem einsöhligen und dem zweisöhligen System ist zu ersehen bei einer vergleichenden Betrachtung der zeitlichen Entwicklung des Sättigungsgrades in den Einlagerungsstrecken für die Wirtsgesteinsinformation Tonsteingebirge entsprechend Abbildung 5.102. Im zweisöhligen System steigt der Sättigungsgrad etwas langsamer an als im einsöhligen System. Im zweisöhligen System wird im Bereich der Einlagerungsstrecken (Beobachtungspunkte 1 und 2) entsprechend Abbildung 5 etwa 200 Jahre nach Verschluss der Einlagerungssohle ein Sättigungsgrad von $SI \approx 0,81$ erreicht, während im einsöhligen System zum gleichen Zeitpunkt an der gleichen Position bereits ein Sättigungsgrad von $SI \approx 0,84$ erreicht wird. Ursache dafür ist, dass sich im zweisöhligen System der Zutritt des Porenwassers in die Einlagerungssohle insbesondere aus dem Gebirgsbereich zwischen der Einlagerungs- und der Monitoringsohle etwas reduziert, da sich ein Teil dieses Porenwassers nunmehr in Richtung der Monitoringsohle bewegt.

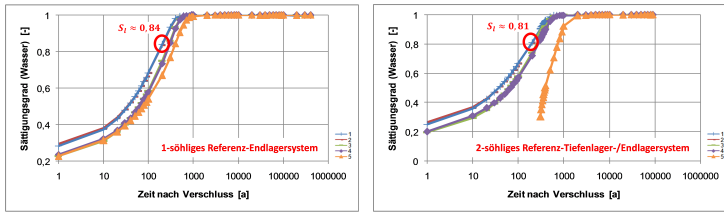


Abbildung 5.102: Zeitabhängige Entwicklung des Sättigungsgrades in ausgewählten Berechnungszonen innerhalb des Grubengebäudes.

Grundsätzlich zeigt sich im Rahmen der hier getroffenen Annahmen und Voraussetzungen, dass die zeitabhängigen Entwicklungen der fluid-dynamischen Zustandsgrößen insgesamt nur marginal von der Anordnung einer Monitoringsohle beeinflusst werden.

Abschließend zu erwähnen ist, dass genau diese mit dem FTK-Simulator für verschiedene Zeitpunkte und Positionen erhaltenen Zustandsgrößen wie z. B. Temperatur, Sättigungsgrad und Porengasdruck, aber auch weitere Zustandsgrößen wie Gebirgsdeformationen und Versatzdruck eine Überwachung des Tiefenlagers ermöglichen, kennzeichnen sie in einer aus den rechnerischen Simulationen folgenden Bandbreite doch das Verhalten eines sich den Erwartungen entsprechend entwickelnden Tiefenlager- / Endlagersystems. Bei signifikanten Abweichungen von diesen Erwartungswerten wäre zu prüfen, welche Ursachen bestehen könnten, welche Auswirkungen sicherheitstechnisch resultieren und wie weiter vorzugehen ist. Ultima ratio wäre dann die Rückholung der Abfälle.

Fluiddynamische Prozesse im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge: Langzeitphase. Trotz des Versatzes der Monitoringbohrlöcher und der Monitoringsohle ist nach Ende der Monitoringphase in den rechnerischen Simulationen eine Gasmigration aus der Einlagerungssohle durch die Monitoringbohrlöcher in die Monitoringsohle zu beobachten, und zwar durch den Porenraum des Versatzmaterials. Im Hinblick auf die hydraulische Durchlässigkeit des Versatzmaterials in den Monitoringbohrlöchern sind die gleichen Materialeigenschaften angesetzt worden wie in den versetzten Strecken der Einlagerungs- und der Monitoringsohle. Dokumentiert sind diese angesetzten Materialeigenschaften in Lux u. a. (2018).

Abbildung 5.103 zeigt exemplarisch für das Referenz-Tiefenlager- / Endlagersystem im Tonsteingebirge die Gasmigration im Bereich der Einlagerungssohle, der Monitoringbohrlöcher und der Monitoringsohle zum

Zeitpunkt $t = 1.000$ a nach Verschluss der Einlagerungssohle. Da zu diesem Zeitpunkt die aus der Behälterkorrosion resultierende Gasbildung noch nur einen marginalen Einfluss auf die ablaufenden fluiddynamischen Prozesse hat, werden in Abbildung 5.103 vornehmlich die Bewegungen der aus der Einlagerungssohle durch das aus dem umgebenden Tonsteingebirge zufließende Porenwasser verdrängten Porenluft dargestellt. Anhand der dargestellten Migrationsvektoren ist zu ersehen, dass sich die verdrängte Porenluft innerhalb der Einlagerungsstrecken von den Endbereichen der jeweiligen Einlagerungsstrecken zunächst in Richtung Kammerverschlussbauwerk bewegt, wobei sich das migrierende Gas auf Höhe der Monitoringbohrlöcher aufteilt, so dass ein Teil der verdrängten Porenluft durch die versetzten Monitoringbohrlöcher in die Monitoringsohle migriert und sich am oberen Bohrlochende weiter in die beiden abzweigenden Streckenrichtungen verteilt. Diese Gasbewegung führt zu einem im Vergleich mit der Situation im Referenz-Endlagersystem ohne Monitoringsohle im Tonsteingebirge etwas langsameren Fluiddruckaufbau in der Einlagerungssohle, so dass der Gasdruck den hydrostatischen Druck erst etwa 2.000 Jahre später erreicht. Ebenso wie für das Referenz-

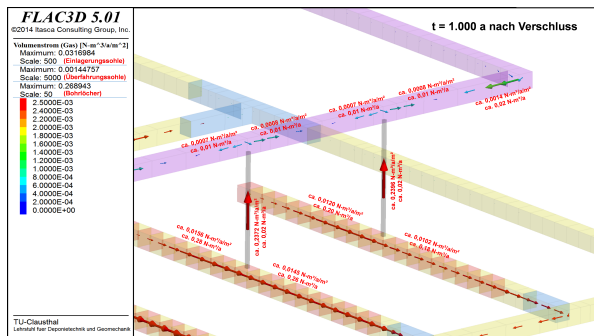


Abbildung 5.103: Visualisierung der Gasmigration in Einlagerungssohle, Monitoringbohrlöchern und Monitoringsohle zum Zeitpunkt $t = 1.000$ a nach Verschluss der Einlagerungssohle für das Referenz-Tiefenlager- / Endlagersystem im Tonsteingebirge.

Endlagersystem ohne Monitoringsohle können auch für das Referenz-Tiefen- / Endlagersystem mit Monitoringsohle die Zustandsgrößen im Bereich der Einlagerungssohle und des umgebenden Barrieregebirges in ihrer zeitlichen Entwicklung dargestellt werden. Da längerfristig allerdings im Grundsatz ähnlich Verläufe erhalten werden, soll an dieser Stelle

unter Verweis auf Lux u. a. (2018) auf eine weitere explizite Darstellung verzichtet werden.

Literatur

- [BMU 2010] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 2010 – Forschungsbericht
- [Bollingerfehr u. a. 2012] Bollingerfehr, Wilhelm; Filbert, Wolfgang; Dörr, Sabine; Herold, Philipp; Lerch, Christian; Burgwinkel, Paul; Charlier, Frank; Thomauske, Bruno; Bracke, Guido; Kilger, Robert: *Endlagerauslegung und -optimierung: Bericht zum Arbeitspaket 6 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. Köln: Ges. für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), 2012 (GRS 281)
- [Brunner-Schwer 1986] Brunner-Schwer, Andreas: *Betriebswirtschaftliche Studententexte*. Bd. 5: *Die Szenario-Technik als Prognoseunterlage zur Ermittlung der Absatzchancen und -risiken bei High-Tech-Produkten, dargestellt am Beispiel des Glasfaserkabels*. Unterföhring: GBI-Verlag, 1986
- [BfE 2018] Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit: *BfE - Zwischenlager*. https://www.bfe.bund.de/DE/ne/zwischenlager/zwischenlager_node.html, 2018
- [StandAG 2017] Deutscher Bundestag: *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG)*. Juli 2017 – Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- [Ellinger u. a. 2010] Ellinger, Alexander; Geupel, Sandra; Gewehr, K.; Gmal, Bernhard; Hannstein, Volker; Hummelsheim, Klemens; Kilger, Robert; Wagner, Markus; Schmidt, Gerhard; Spieth-Achtnich, Angelika: *Sicherheitstechnische Aspekte der langfristigen Zwischenlagerung von bestrahlten Brennelementen und verglastem HAW / Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)*. Köln, April 2010 (GRS-A3597) – Forschungsbericht

- [Endlagerkommission 2016] Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Hrsg.). Deutscher Bundestag: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Verantwortung für die Zukunft: Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes / Deutscher Bundestag. Berlin, 2016 (18/9100) – Bundestagsdrucksache – 684 S.
- [Engelmann u. Lommerzheim 1995] Engelmann, Heinz J.; Lommerzheim, André: *Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB: Untersuchung zur Rückholbarkeit von eingelagertem Kernmaterial in der Nachbetriebsphase eines Endlagers*. Peine: DBE, 1995 (DEAB T 57)
- [Geschka u. Hammer 1990] Geschka, Horst; Hammer, Richard: Die Szenario-Technik in der strategischen Unternehmensplanung. In: Hahn, Dietger (Hrsg.); Taylor, Bernard (Hrsg.): *Strategische Unternehmensplanung / Strategische Unternehmensführung*. 5. Aufl. Heidelberg: Physica, 1990, S. 311–336
- [Hassel u. a. 2018] Hassel, T.; Köhler, A.; Kurt, Ö.: Das ENCON Behälterkonzept – Generische Behältermodelle zur Einlagerung radioaktiver Reststoffe für den interdisziplinären Optionenvergleich. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2018 – ENTRIA Arbeitsbericht – In Vorbereitung.
- [International Atomic Energy Agency 2009] International Atomic Energy Agency: *Geological disposal of radioactive waste: technological implications for retrievability*. Wien: International Atomic Energy Agency, 2009 (IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.19)
- [Jacobi 1981] Jacobi, Oskar: *Praxis der Gebirgsbeherrschung*. 2. Aufl. Essen: Glückauf, 1981
- [KlimaBergV 1983] *Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen*. Juni 1983 – Klima-Bergverordnung vom 9. Juni 1983 (BGBl. I S. 685), die durch Artikel 5 Absatz 2 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist.
- [Lux u. a. 2018] Lux, Karl-Heinz; Düsterloh, Uwe; Wolters, Ralf; Zhao, Juan; Rutenberg, Michael; Feierabend, Jörg; Pan, Tianjie; Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (Hrsg.): *Multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Möglichkeit eines direkten Monitorings – Ein Beitrag zur Verbesserung des geomechanischen und fluiddynamischen Systemverständnisses bei TH2M-gekoppelten Prozessen*. Bd. 23. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger Verlag, 2018

[Lux u. a. 2017a] Lux, Karl-Heinz; Wolters, Ralf; Zhao, Juan: Auf dem langen Weg zu einem Endlager für hochradioaktive, Wärme entwickelnde Abfälle. Ein neuer konzeptionell-konfigurativer Ansatz und ein neues Simulationswerkzeug zur Erarbeitung eines verbesserten Prozess- und Systemverständnisses für HAW-Entsorgungsanlagen - ohne und mit direktem längerfristigem Monitoring. Teil I: Endlagerforschung zwischen den Anforderungen nach technischer Sicherheit und sozialer Gerechtigkeit. In: *atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie* 62 (2017), Nr. 3, 185–198. http://www.kernenergie.de/kernenergie-wAssets/docs/fachzeitschrift-atw/2017/atw_2017-03_185_Weg_zum_Endlager.pdf

[Lux u. a. 2017b] Lux, Karl-Heinz; Wolters, Ralf; Zhao, Juan: Auf dem langen Weg zu einem Endlager für hochradioaktive Wärme entwickelnde Abfälle – Ein neuer konzeptionell-konfigurativer Ansatz und ein neues Simulationswerkzeug zur Erarbeitung eines verbesserten Prozess- und Systemverständnisses für HAW-Entsorgungsanlagen – ohne und mit direktem längerfristigem Monitoring. Teil II: Der FTK-Simulator als neues Werkzeug zur Analyse fluiddynamischer Prozesse in einer HAW-Entsorgungsanlage. In: *atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie* 62 (2017), Nr. 4, 244–257. http://www.kernenergie.de/kernenergie-wAssets/docs/fachzeitschrift-atw/2017/atw2017_04_244_Weg_zum_Endlager_2.pdf

[Lux u. a. 2017c] Lux, Karl-Heinz; Wolters, Ralf; Zhao, Juan: Auf dem langen Weg zu einem Endlager für hochradioaktive Wärme entwickelnde Abfälle – Ein neuer konzeptionell-konfigurativer Ansatz und ein neues Simulationswerkzeug zur Erarbeitung eines verbesserten Prozess- und Systemverständnisses für HAW-Entsorgungsanlagen – ohne und mit direktem längerfristigem Monitoring. Teil III: Ein neues konzeptionelles und konfiguratives Konzept zur Entsorgung hochradioaktiver Wärme entwickelnder Abfälle. In: *atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie* 62 (2017), Nr. 5, 317–326. http://www.kernenergie.de/kernenergie-wAssets/docs/fachzeitschrift-atw/2017/atw2017_05_317_Weg_zum_Endlager_3.pdf

- [Lux u. a. 2017d] Lux, Karl-Heinz; Wolters, Ralf; Zhao, Juan; Rutenberg, Michael; Feierabend, Jörg; Pan, Tianjie; Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (Hrsg.): ENTRIA-Arbeitsbericht 07: TH2M-basierte multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle – Ein Beitrag zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz im Hinblick auf die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Clausthal-Zellerfeld, 2017 – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Léon Vargas u. a. 2017] Léon Vargas, Rocio P.; Stahlmann, Joachim; Mintzlaß, Volker: Thermal impact in the geometrical settings in deep geological repositories for HLW with retrievability and monitoring. In: *16th International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM 2017)* Bd. 2017. Charlotte: American Nuclear Society, 2017, S. 664–671
- [Missal u. a. 2014] Missal, Christian; Döring, Ina; Stahlmann, Joachim: Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Steinsalz aus der flachen und steilen Lagerung. In: *geotechnik* 37 (2014), Nr. 3, S. 177–184
- [MoDeRn 2013] MoDeRn; NDA (Hrsg.); Nagra (Hrsg.); NRG (Hrsg.): MoDeRn Monitoring Reference Framework report / European Commission. 2013 (D1.2) – Deliverable
- [Stahlmann 2018] Stahlmann, Joachim: Auswirkung der Rückholbarkeit auf die Auslegung von Tiefenlagern hochradioaktiver Reststoffe. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2018 – ENTRIA Arbeitsbericht – In Vorbereitung.
- [Stahlmann u. a. 2018] Stahlmann, Joachim; Léon Vargas, Rocio P.; Mintzlaß, Volker; Epkenhans, Ida: Normalszenarien und Monitoringkonzepte für Tiefenlager mit der Option Rückholung. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2018 – ENTRIA Arbeitsbericht – In Vorbereitung.
- [Stahlmann u. a. 2014] Stahlmann, Joachim; Mintzlaß, Volker; Léon Vargas, Rocio P.: Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe. 2014 – Interner Bericht

- [Stahlmann u. a. 2015] Stahlmann, Joachim; Mintzlaff, Volker; Léon Vargas, Rocio P.; Institut für Grundbau und Bodenmechanik (Hrsg.): Generische Tiefenmodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung. Braunschweig, 2015 (3) – ENTRIA Arbeitsbericht
- [Stahlmann u. a. 2016] Stahlmann, Joachim; Mintzlaff, Volker; Léon Vargas, Rocio P.: Geotechnische und geologische Aspekte für Tiefenlagerkonzepte mit der Option der Rückholung der radioaktiven Reststoffe. In: *Bautechnik* 93 (2016), Nr. 3, 141–150. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bate.201500068/abstract>
- [Ziegenhagen u. a. 2005] Ziegenhagen, Jürgen; Bollingerfehr, Wilhelm; Skrzyppek, Jürgen; Schlickenrieder, L; Chapman, Neil A.; Nirvin, Bosse; Sjöblom, Rolf; Svemar, Christer: Untersuchung der Möglichkeiten und der sicherheitstechnischen Konsequenzen einer Option zur Rückholung eingelagerter Abfälle aus einem Endlager / DBE Technology GmbH/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Peine, 2005 (Z2.2.7/WS 1006/8489-2) – Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz – 104 S.

5.7 Vertikalprojekt 7 – Oberflächenlagerung

5.7.1 Zielsetzung des Teilprojektes

Obertägige Zwischenlager für hoch radioaktive Abfälle werden weltweit an über 150 Standorten betrieben. Der technische Entwurf eines Zwischenlagers wird in der industriellen Praxis im Wesentlichen durch die Art des zu lagernden Abfalls, die angestrebte Nutzungsdauer und den davon abhängigen Betriebsabläufen bestimmt. Die genehmigte Betriebsdauer ist vom Genehmigungsverfahren und -zeitpunkt abhängig und beträgt in Deutschland etwa 40 Jahre (vgl. § 6 Abs. 5 AtG und Semper (2017)). Die Aufbewahrung in Zwischenlagern ist auch auf internationaler Ebene grundsätzlich mit der Intention verbunden, die Abfälle zu einem späteren, aber möglichst frühen Zeitpunkt in ein in einigen hundert Metern Tiefe befindliches Endlager zu bringen. Wird eine obertägige oder oberflächennahe Zwischenlagerung auch für längere Zeiträume von mehreren hundert Jahren als temporäre Alternative zur schnellstmöglichen Endlagerung in Betracht gezogen oder davon ausgegangen, dass ein Endlager nicht früher verfügbar sein wird, kommen zu den Bedingungen für heute betriebene Zwischenlager erhebliche weitere Anforderungen hinzu, die den empirisch-technischen Erfahrungsrahmen zum Teil übersteigen.

Zwischenlager sind stets technische Mehrbarriersysteme, deren primäre Aufgabe darin besteht, den Menschen und seine Umwelt vor den schädigenden Einflüssen ionisierender Strahlung zu schützen. Der Schutz wird durch die Dimensionierung der einzelnen Komponenten (Barrieren) generiert. Da bei vielen Zwischenlagersystemen zur Lagerung von bestrahlten Brennelementen und verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung jedoch der Behälter als Hauptkomponente zur Gewährleistung der wesentlichen Schutzfunktionen angesehen wird, konzentrierten sich Forschungsarbeiten in der Vergangenheit hauptsächlich auf das (Langzeit-)Verhalten der Behälter⁷¹. Wie sich ein Bauwerk über sehr lange Zeiträume und unter den spezifischen Randbedingungen der Zwischenlagerung hoch radioaktiver, Wärme entwickelnder Reststoffe verhält, wurde hingegen bisher nur in wenigen Ländern, so z. B. in französischen Forschungsprogrammen (Köhnke u. a., 2018), untersucht.

Im Vertikalprojekt 7 ging es u. a. darum, diese spezifische Wissenslücke zu schließen. Die Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Bauwerke⁷² muss, in Abhängigkeit von der Abfallart und Ziel-

⁷¹In Deutschland insbesondere von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) durchgeführt.

⁷²Fachtermini zur Einordnung von Grenzzuständen für den Nachweis von Bauwerken

setzung der Zwischenlagerung, über möglicherweise mehrere Jahrhunderte sichergestellt werden, sofern nicht die Errichtung von Neubauten in regelmäßigen Abständen vorgesehen ist. Dieser Aspekt stellte eine der wesentlichen technischen Herausforderungen im Vertikalprojekt dar.

Zunächst wurden vorhandene Anlagen betrachtet, allgemeine Anforderungen für Zwischenlager zusammengestellt und ein mehrdimensionaler Parameterraum für technische Lösungsansätze mit seinen Abhängigkeiten und Interaktionen aufgestellt. Dadurch wurde eine Grundlage für Ableitungen erfolversprechender Realisierungskonzepte für bestimmte Anforderungs- bzw. Parametersätze geschaffen. Wesentliche einzubeziehende Parameter waren die Reststoffe und Schutzziele, die allgemeinen (bau-)technischen Anforderungen und Konzepte sowie die geplante Einlagerungsdauer und entsprechende Dauerhaftigkeits- und Monitoringkonzepte, insbesondere für die baulichen Strukturen.

Das Teilprojekt war in die folgenden Arbeitspakete unterteilt:

- AP 7.1 Bautechnische Konzepte zur obertägigen Lagerung hoch radioaktiven Abfalls
- AP 7.2 Probabilistisches, monitoringbasiertes Sicherheits- und Life-Cycle-Konzept für die obertägige Lagerung hoch radioaktiven Abfalls
- AP 7.3 Anforderungen an obertägige Lagerungskonzepte aufgrund von Abfallbehandlungsmethoden

5.7.2 AP 7.1 „Bautechnische Konzepte“

Kurzbeschreibung der AP-Ziele. Obertägige Lagerungskonzepte sind stets technische Mehrbarrierensysteme, die aus Einschließungskomponenten (z. B. Hüllrohre, Behälter) und aus bautechnischen Umschließungskomponenten (Bauwerken) bestehen. Als obertägige Lagerungskonzepte sollen obertägige Bauwerke, Deponien und oberflächennahe Grubenanlagen verfolgt werden. In Abhängigkeit von der Aktivität der Abfallstoffe und der vorgesehenen Einlagerungsdauer sollen Lösungskonzepte erarbeitet werden, die auch die betrieblichen Anforderungen berücksichtigen. Ziel ist - ausgehend von einem zu entwickelnden Anforderungskatalog - technische Lösungen zu erarbeiten und diese im Rahmen eines multikriteriellen Bewertungsschemas gegenüber zu stellen. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei die jenseits der bautechnischen Erfahrung zu betrachtende Nutzungsdauer von bis zu 500 Jahren dar. Die Ergebnisse aus dem AP sollen in die gesellschaftliche, rechtliche und risikobezogene Diskussion unterschiedlicher Optionen in den Transversalprojekten eingebunden werden.

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse.

Zwischenlagersysteme

Die Parameter Reststoffe, geplante Einlagerungsdauer, Behälterkonzept und Bauwerk wurden anhand der verfügbaren Literatur über realisierte bzw. geplante Anlagen zur trockenen Zwischenlagerung hoch radioaktiver, Wärme entwickelnder Reststoffe analysiert. Wesentliche Parameter, die eine Gegenüberstellung der verschiedenen Zwischenlagersysteme und länderspezifischen Entsorgungsstrategien ermöglichen sollen, wurden für die weltweit vorhandenen Zwischenlageranlagen in einem eigens dafür konzipierten, browserbasierten Format in Form einer interaktiven Weltkarte dokumentiert. Diese ist über die Institutsseite abrufbar: <http://www.ibmb.tu-bs.de/entria-weltkarte/>. Darüber hinaus wurden ergänzende Informationen zu Behälterkonzepten, wie CAS-TOR®, TN®, CONSTOR®, MAGNASTOR®, NUHOMS®, HI-STORM®, DSC etc. wurden u. a. im Rahmen einer am iBMB betreuten Bachelorarbeit (Bogdashkin, 2015) zusammengetragen und gegenübergestellt.

Im Allgemeinen kann die Einteilung der Zwischenlagersysteme nach verschiedenen Aspekten erfolgen, wie z. B. nach der Intention der Lagerung, der Abfallart, der Art der Kühlung, dem Standort des Lagers, der Art des Bauwerks, der vorgesehenen Lagerungszeit etc. Die gebräuchlichste Einteilung der Zwischenlagersysteme beginnt mit der Klassifizierung nach der Art der Wärmeabfuhr in die Kategorien nass und trocken, wobei die Variantenvielfalt trockener Zwischenlagersysteme bedeutend größer ist. In Abbildung 5.104 ist eine mögliche Einteilung der Zwischenlagersysteme dargestellt.

Nasse Zwischenlagersysteme. Als nasse Zwischenlagersysteme werden solche bezeichnet, bei denen die Brennelemente in wassergefüllten Becken gelagert werden. Eine weitere Einteilung kann erfolgen in „anlagenbezogen“ und „selbstständig“. Reaktornahe Brennelementlager- bzw. Abklingbecken sind fester Bestandteil eines jeden Kernkraftwerks. Die von den bestrahlten Brennelementen ausgehende volumetrische Wärmestromdichte ist direkt nach der Entnahme aus dem Reaktorkern zu hoch, um die Brennelemente in einem Behälter zu verschließen und muss deshalb zunächst für einige Jahre „abklingen“. Nasslager können auch anlagenunabhängig, also autark betrieben werden. Solche Anlagen befinden sich dann als funktionell unabhängige Einrichtungen auf dem Kernkraftwerksgelände (diverse Standorte wie z. B. Olkiluoto in Finnland (siehe Abb. 5.105) oder Kosluduj in Bulgarien), wobei die Infrastruktur

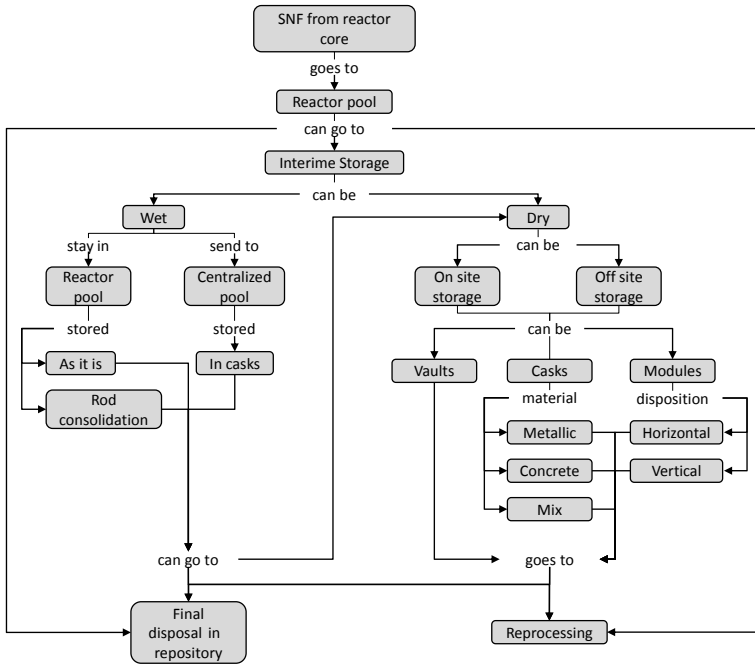


Abbildung 5.104: Mögliche Einteilung der Zwischenlagersysteme nach (Romanato, 2011, S. 2).

des Kernkraftwerkes genutzt werden kann. Alternativ können solche Nasslager an einem Standort abseits vom Kernkraftwerksgelände (z. B. zentrales Zwischenlager CLAB in Oskarshamn in Schweden) oder als Pufferlager in Wiederaufarbeitungsanlagen (z. B. in La Hague, Frankreich oder in Sellafield, Großbritannien) errichtet werden. Heute befindet sich weltweit noch der weitaus größte Teil der bestrahlten Kernbrennstoffe in Nasslagern (Feiveson u. a., 2011; IAEA, 2007).

In Nasslagern werden die nützlichen Eigenschaften des Wassers hinsichtlich seiner guten Wärmeleitfähigkeit und seiner Neutronenabschirmung genutzt. Deren Auslegung folgt im Allgemeinen den Schutzzielen, die sichere Abfuhr der Zerfallswärme, eine unterkritische Konfiguration der Kernbrennstoffe und den sicheren Einschluss des radioaktiven Materials zu gewährleisten (Arndt u. a., 2003). Heutige Nasslager können über einzelne oder mehrere, miteinander verbundene Wasserbecken verfügen und befinden sich innerhalb baulicher Strukturen (Gebäudehülle,

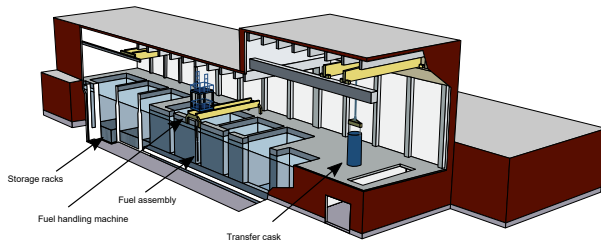


Abbildung 5.105: Nasslager im finnischen Olkiluoto, schematisch nach www.posiva.fi.

Untertagebauwerk). In den Wasserbecken werden die bestrahlten Brennelemente in Lagergestellen auf dem Boden des jeweiligen Beckens angeordnet. Die Beckenwände müssen über eine ausreichende mechanische Widerstandsfähigkeit verfügen und einen hinreichenden Beitrag zur Abschirmung der Strahlung leisten. Zur Einhaltung der Schutzziele ist eine bestimmte Wasserüberdeckung notwendig, ein Austreten des Wassers ist zu verhindern. Die meisten Wasserbecken verfügen daher neben einer umhüllenden massigen Stahlbetonkonstruktion auch über einen innen liegenden Liner aus korrosionsbeständigem Stahl, der einen Wasserverlust durch Risse im Stahlbeton verhindern soll. Zudem trägt der Liner zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Stahlbetonbauteile bei und erleichtert die Dekontamination beim Rückbau der Wasserbecken. In einigen Ländern werden oberhalb der Wasseroberfläche Stahlplatten platziert, die begangen werden können und die Wasserdampfdiffusion bzw. Verdunstung des Wassers begrenzen (IAEA, 2007, 2009b, 2005; Bunn u. a., 2001).

Nasslager verfügen über Verladebereiche, die u. a. mit Handhabungseinrichtungen (z. B. Kränen) zum Be- und Entladen von Transportbehältnissen ausgestattet sind (siehe Abb. 5.105, rechts). Im Fall mehrerer verbundener Wasserbecken erlauben – sofern vorhanden – in den Verbindungsstücken befindliche wasserdichte Schotte die Unterteilung in unabhängige Einheiten, die in Reihe oder parallelgeschaltet sein können. Einzelne Wasserbecken können dann planmäßig (für Instandhaltungsarbeiten) oder auch unplanmäßig in einem Notfall (z. B. Leckage im betreffenden Becken) geleert werden (IAEA, 2007, 2009b).

Nasslager können darüber hinaus mit weiteren technischen Einrichtungen ausgestattet werden. Zum einen kann die Wasserqualität hinsichtlich einer möglichen Kontaminationsanreicherung überwacht und / oder das Wasser durch Ionentauscher und Filtereinrichtungen gereinigt werden. Zum anderen müssen die Wassertemperaturen geregelt werden. Nassla-

ger werden normalerweise bei Wassertemperaturen unter 40°C betrieben und aktiv über einen separaten Kühlkreislauf gekühlt. Solche Kühlsysteme sind jeweils redundant vorhanden, um den Ausfall eines Systems kompensieren zu können (IAEA, 2009b, 2006a).

Systeminhärente Unsicherheiten ließen sich trotz stetiger Weiterentwicklung (in den Anfängen der Kernenergienutzung wurden Wasserbecken zum Teil noch unter freiem Himmel errichtet und über lange Zeit mit unzureichender Wasserfiltration und ohne abdichtenden Liner betrieben) jedoch nicht vollständig beheben (IAEA, 2006a). Wegen der leistungsfähigen Wärmeabfuhr und Neutronenabschirmung des Wassers können in Nasslagern in der Regel große Abfallmengen auf verhältnismäßig kleinem Raum gelagert werden. Gleichzeitig hängt die Funktionstüchtigkeit eines Nasslagers im Wesentlichen von einer ausreichenden Wasserüberdeckung und Kühlung ab. Erstere kann besonders durch extreme Ereignisse (z. B. Erdbeben, Flugzeugabsturz) signifikant beeinträchtigt werden, letztere wird derzeit nur durch aktive Systeme sichergestellt.

Es wird deutlich, dass eine Aufbewahrung der Abfälle in Nasslagern mit einem vergleichsweise erhöhten betrieblichen Aufwand und mit höheren Risiken verbunden ist. Die aufwändigere Anlagentechnik (notwendige aktive Kühlung, Filterung des Wassers, Entsorgung der Filterrückstände) und vergleichsweise große Mengen an Brennelementen in (nur) einem großen „abgeschlossenen“ System (im Vergleich zu Lagerbehältern) erhöhen zudem die Störungsanfälligkeit, was in einer insgesamt niedrigeren Robustheit resultiert.

„Although pools are used extensively, they have inherent safety risks owing to loss of water, either catastrophically (e.g. after an earthquake) or because of leaks, loss of cooling, corrosion and degradation of structural and stored materials, complex water chemistry to inhibit corrosion and algae formation, as well as some risk of criticality“ (IAEA, 2006a, S. 13).

Trockene Zwischenlagersysteme. Seit den frühen 1970er Jahren wurden funktionell unabhängige, trockene Zwischenlagersysteme entwickelt. Die notwendige Wärmeabfuhr erfolgt durch einen zwischen den im Gebäude angeordneten Zu- und Abluftöffnungen entstehenden Luftstrom, der im Wesentlichen durch die Wärmeentwicklung der Abfälle und die Höhendifferenz zwischen den Zu- und Abluftöffnungen angetrieben wird (thermischer Auftrieb). Charakteristisch für alle trockenen Zwischenlagersysteme ist, dass die innere Umschließung der radioaktiven Materialien (Hüllrohre, Stahlkokillen) umgebende Medium nicht Wasser, sondern ein Inertgas ist, wodurch Korrosionsprozesse gehemmt werden. Zur Abschirmung der Gamma- und Neutronenstrahlung ist demnach der Einsatz ge-

eigneter Behältermaterialien erforderlich. Die Materialwahl muss sowohl den Erfordernissen aus Neutronenabbremung und -einfang sowie der Abschirmung der auch bei der Neutronenabschirmung als Sekundärstrahlung entstehenden Gammastrahlung Rechnung tragen. Diese konzeptionelle Herausforderung resultiert in einer Vielzahl verschiedener, trockener Zwischenlagersysteme, die nach der gebräuchlichsten Einteilung in die Klassen Behälter, Modul und Vault unterschieden werden (siehe Abb. 5.104).

- Behälter

Für Behältersysteme lassen sich weitere Unterscheidungen hinsichtlich ihres Einsatzzwecks oder der eingesetzten Materialien treffen. Metallische Behälter werden häufig als Transport- und Lagerbehälter (dual-purpose casks) ausgelegt, die den hoch radioaktiven Inhalt mit einer dicken metallischen Wandung umschließen. Das Behälterinnere ist mit Inertgas gefüllt und in der Regel durch Doppeldeckelsysteme mit metallischen Dichtungen verschlossen. Der Behälterkörper trägt hauptsächlich zur Abschirmung bei und besteht in der Regel aus geschmiedetem Stahl, Gusseisen oder Werkstoffverbünden (IAEA, 2007) Beispiele für solche Behältersysteme sind Behälter vom Typ CASTOR® oder TN®. In deren Behälterkörpern sind zusätzlich wasserstoffreiche Materialien zur Neutronenabschirmung eingelassen, z. B. Stäbe aus Polyethylen. Für die Zwischenlagerung werden die Behälter im Freien auf einer Sohlplatte aufgestellt oder, wie es in Europa der Regelfall ist, von einer baulichen Struktur umgeben.

Weitere Behälterarten ähneln in ihrer dickwandigen Bauart den metallischen Behältern. Die Wandung besteht jedoch aus innen- und außenliegenden Stahl liners, in deren Zwischenraum bewehrter (Schwer-)Beton zur Strahlenabschirmung eingebracht wird. Die Behälter werden genauso wie metallische Behälter stehend gelagert und können als Transport- und Lagerbehälter ausgebildet werden, wobei möglicherweise weitere technische Maßnahmen für eine Transportzulassung erforderlich sein können. Beispiele für solche Behälterbauarten sind Behälter vom Typ CONSTOR® oder Dry Storage Container (DSC).

- Module

Im Gegensatz dazu bestehen Zwischenlagermodule aus einer bewehrten monolithischen Betonkonstruktion, die als eine Art Einhausung einen metallischen Innenbehälter umgibt. Die Betonkonstruktionen sind nicht für den Transport entwickelt und daher ortsfeste Einrichtungen. Sie können als modulare Einhausungen (NUHOMS®) oder in Siloform (z. B. HI-STORM®, MAGNASTOR®) ausgebildet sein. Der be-

ladene Innenbehälter wird, je nachdem, ob die Zwischenlagerung horizontal oder vertikal erfolgt, am Lagerungsplatz in den Betonbehälter eingeschoben bzw. eingehoben (IAEA, 2007; EPRI, 2010).

- Vaults

Ebenfalls ortsfeste Systeme sind sogenannte Vaults, die aus großen und massigen Stahlbetonstrukturen bestehen und über ein oder mehrere Felder reihenartig angeordneter metallischer Röhren verfügen. In diesen Röhren werden vorwiegend von Kokillen umschlossene verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung zwischengelagert. Abhängig von deren Standort und Auslegung werden Vaults als eigenständige Anlagen mit entsprechender technischer Ausstattung (z. B. HABOG in Vlissingen, Niederlande) oder als verhältnismäßig einfache modulare Lagereinrichtungen (z. B. MACSTOR®) betrieben. An einigen Zwischenlagerstandorten werden bestrahlte Brennelemente in Vault-Systemen gelagert, d. h. direkt in metallische Röhren eingehoben (z. B. MVDS in Paks, Ungarn) (Feiveson u. a., 2011; IAEA, 2007; EPRI, 2010).

- Weitere Systeme

Zusätzlich zu den beschriebenen Systemen gibt es noch weitere Zwischenlagersysteme, die konzeptionell auf den zuvor beschriebenen Systemen basieren, aber in der Nähe der Erdoberfläche errichtet werden, wie z. B. das System HI-STORM® für die Zwischenlagerung im oberflächennahen Bereich (Endungen: 100U, CIS, UMAX). Am Zwischenlagerstandort werden stählerne zylindrisch geformte Lagerkammern, sogenannte Vertical Ventilated Modules (VVM), vorgehalten, die so tief in den Boden eingelassen sind, dass deren Oberkante mit der Erdoberfläche abschließt. Die für die Errichtung auszuhebende Baugrube wird mit drei Betonschichten versehen: einer bewehrten Sohl- sowie einer abdeckenden Platte mit dazwischenliegendem Massenbeton. Nach dem Erhärten der Sohlplatte werden die Lagerkammern bei der Betonage der beiden oberen Schichten durch die VVM offengehalten. Analog zu den Betonmodulen werden metallische Innenbehälter zunächst mit dem hoch radioaktiven Inhalt beladen, zum Zwischenlagerstandort transportiert und dort in deren Zwischenlagerungsposition – hier in das jeweilige VVM – eingehoben (IAEA, 2007; EPRI, 2010). Ein Beispiel für den Einsatz des Systems HI-STORM UMAX wurde 2015 in Betrieb genommen und befindet sich auf dem Gelände des Kernkraftwerks Calaway (Holtec, 2015).

Zwischenlagersysteme können auch (nahe) unter der Erdoberfläche errichtet und betrieben werden, wie das bereits genannte Nasslager CLAB in Oskarshamn, Schweden oder das dezentrale Zwischenlager in Neckar-

westheim, Deutschland, in dem die metallischen Transport- und Lagerbehälter in Tunnelröhren aufbewahrt werden. In französischen Forschungsarbeiten wurden Zwischenlager in geringer Tiefe im Hinblick auf die langfristige Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle untersucht. Diese haben zwar analog zu Endlagern einen höheren Schutzgrad gegenüber Flugzeugabsturz und schirmen Direktstrahlung besser ab. Diesen Vorteilen stehen aber (gerade bei langen Betriebszeiten) die schlechtere Inspizierbarkeit aufgrund der fehlenden Zugänglichkeit äußerer Bauteile, der finanzielle Mehraufwand, der notwendige Umgang mit Gewässern und längere Distanzen zur Wärmeabfuhr entgegen (ANDRA, 2012). Die Betrachtung dieser oberflächennahen Konzepte wurde daher nicht weiter vertieft.

Richtlinien, Regelwerke

In Abbildung 5.106 ist die Verknüpfung der verschiedenen Ebenen kerntechnischer Normen am Beispiel von Großbritannien in Form einer Pyramide dargestellt. Die Spitze der Pyramide adressiert Dokumente, die von internationalen Institutionen erarbeitet werden und die Basis für die nationale Gesetzgebung bilden. Eine weitere Ebene darunter werden spezifische Vorschriften zur Genehmigung, Ausgestaltung und zum Betrieb von kerntechnischen Anlagen erarbeitet. Die praktischen Betriebserfahrungen sowie Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung bilden die unterste Ebene der Pyramide ab. Nach dieser Systematik werden Anforde-



Abbildung 5.106: Regelwerkspyramide nach NDA (2017).

rungen für den Bau und Betrieb von Zwischenlagern auf internationaler Ebene erarbeitet und sollen in nationales Recht umgesetzt werden. Dabei steht es den Nationalstaaten frei, die Anforderungen an die nationale Situation anzupassen. Interessante Anforderungen, die im speziellen die langfristige Zwischenlagerung hoch radioaktiver Reststoffe adressieren, müssen dementsprechend zunächst in Dokumenten internationaler Institutionen, dann aber auch in nationalen Dokumenten gesucht werden. In der Regel müssen Anforderungen, die für die Zwischenlagerung postuliert werden, auch für die langfristige Zwischenlagerung gelten. Die Anforderungen für die Zwischenlagerung bilden folglich die Grundlage sinnvoller Ableitungen für langfristige Zwischenlager.

Leitlinien der IAEA

Die International Atomic Energy Agency (IAEA) wurde 1957 als autonome Organisation der Vereinten Nationen gegründet. Die IAEA berichtet jährlich der Generalversammlung der Vereinten Nationen und ruft im Falle einer Gefährdung des internationalen Friedens den Weltsicherheitsrat an. Mittlerweile gehören ihr mehr als 160 Staaten an. Die IAEA verfügt heute über etwa 2.500 Mitarbeiter aus mehr als 100 Ländern, von denen die meisten an ihrem Hauptsitz in Wien tätig sind (vgl. www.iaea.org).

Ein wichtiger Schwerpunkt der Arbeit der IAEA ist die internationale Angleichung der Sicherheit kerntechnischer Anlagen (DATF, 2013). Im Rahmen dieser Aufgabe veröffentlicht die IAEA Leitlinien, die Safety Standards. Die Safety Standards werden von Komitees, die aus national berufenen Vertretern und internationalen Experten bestehen, erarbeitet. Die Standards sind für die Mitgliedsstaaten der IAEA zwar nicht verbindlich, bilden aber in der Praxis die Grundlage für national erlassene Regelungen (DATF, 2013). Die Safety Standards sind in drei hierarchisch angeordnete Ebenen unterteilt:

- Safety Fundamentals,
- Safety Requirements,
- Safety Guides.

In den Safety Fundamentals ist das fundamentale, für alle Safety Standards verbindliche Schutzziel, den Menschen und seine Umwelt vor den schädigenden Einflüssen ionisierender Strahlung zu schützen (IAEA, 2006b, S. 4), festgeschrieben. Zudem werden zehn Sicherheitsprinzipien zu Verantwortung, Zuständigkeit und Prävention formuliert, die die Basis für die Ableitung der Safety Requirements bilden (IAEA, 2006b, S. 5–16). Die Safety Requirements sollen für die Mitgliedsstaaten eine Übertragung in harmonisierte nationale Vorschriften ermöglichen (IAEA, 2012a).

Unterschieden wird zwischen allgemeinen und spezifischen Sicherheitsanforderungen (General / Specific Safety Requirements). In den Specific Safety Requirements werden Sicherheitsanforderungen anlagen- oder tätigkeitsbezogen konkretisiert. In Abbildung 5.107 ist eine Übersicht der Safety Requirements und ihre Stellung innerhalb der Safety Standards dargestellt. Die Safety Guides enthalten Empfehlungen, die den aktuellen Stand internationaler Praxis widerspiegeln und den Anwendern die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen ermöglichen sollen.

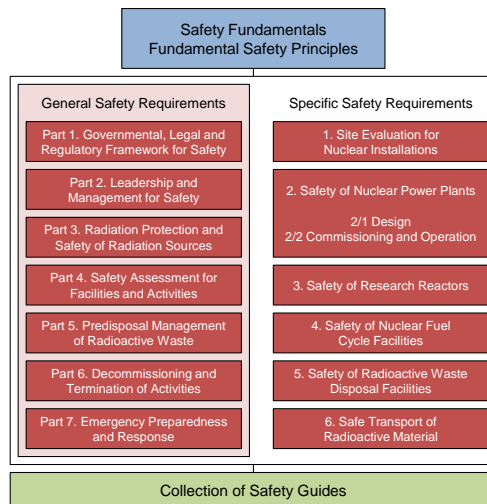


Abbildung 5.107: Stellung der Safety Requirements im Rahmen der Safety Standards nach IAEA (2012a).

In der folgenden Aufzählung sind diejenigen Safety Standards herausgestellt, die unmittelbar im Zusammenhang mit der Zwischenlagerung stehen:

- Safety Fundamentals Fundamental Safety Principles (IAEA No. SF-1)
- Safety Requirements
 - General Safety Requirements -GSR Part 1-7
 - Specific Safety Requirements

- Safety of Nuclear Fuel Cycle Facilities (IAEA No. SSR-4), wobei die Zwischenlagerung aufgrund der betrieblichen Abläufe auch die Sicherheitsanforderungen für den Transport (IAEA No. SSR-6) berührt.
- Safety Guides
 - The Management System for the Processing, Handling and Storage of Radioactive Waste Series No. GS-G-3.3, published Wednesday, 02 July, 2008.
 - Storage of Spent Nuclear Fuel Series No. SSG-15, published Tuesday, 27 March, 2012.
 - Storage of Radioactive Waste Series No. WS-G-6.1, published Tuesday, 28 November, 2006.
 - Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle Facilities Series No. WS-G-2.4, published Monday, 18 June, 2001.

Die beiden Safety Guides für die technischen Aspekte der Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und verglaster Abfälle (IAEA, 2012b, 2006b) sind ähnlich aufgebaut und enthalten jeweils Empfehlungen für den Entwurf und den Betrieb eines Zwischenlagers. Da beim Entwurf bereits viele wichtige Parameter wie z. B. Lagersystem, -kapazität, aufnehmbare Abfallarten, vorgesehene Nutzungsdauer sowie Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einwirkungen festgelegt werden, kommt dem Entwurfsprozess eine besondere Bedeutung zu. Die grundlegenden Betriebsabläufe werden festgelegt und die notwendigen räumlichen und technischen Voraussetzungen für einen sicheren Betrieb geschaffen. Eine nachträgliche Änderung nicht berücksichtigter Aspekte kann mit einem hohen Aufwand verbunden sein. Dementsprechend sollen bereits mit dem Entwurf die Voraussetzungen für ein sicheres und robustes Zwischenlagersystem geschaffen werden. Hierfür lassen sich u. a. die folgenden wesentlichen Schutzziele anhand der beiden Leitlinien identifizieren:

- Einschluss der radioaktiven Materialien
- Abschirmung
- Unterkritikalität
- Wärmeabfuhr
- Handhabbarkeit der Abfälle

Die Struktur nationaler Richtlinien wird teilweise anhand dieser Schutzziele aufgebaut (siehe Abschnitt ab Seite 5.7.2). Außerdem bestimmen die genannten Schutzziele den Entwurf von Zwischenlagern maßgebend und sollen deshalb im Folgenden kurz erläutert werden.

Einschluss der radioaktiven Materialien. Das Design eines Zwischenlagers und der darin enthaltenen Handhabungssysteme sollte Maßnahmen vorsehen, die das unkontrollierte Austreten von Radionukliden in die Umwelt verhindern (vgl. (IAEA, 2012b, S. 40)). Die daraus resultierenden Anforderungen an die Lüftung bzw. deren Überwachung sind den Anforderungen zur Gewährleistung des Strahlenschutzes und der Abschirmung teilweise ähnlich, weshalb diese im Folgenden zusammengefasst werden. Das Zwischenlagersystem als Ganzes sollte als Multibarriersystem für den Einschluss der radioaktiven Materialien ausgebildet werden, in dem von jeder zuverlässig wirksamen Komponente (Abfallmatrix, Brennstoffhülle, Behälter, Gebäudestrukturen) Rechnung getragen wird (vgl. (IAEA, 2012b, S. 29f)). Der sichere Einschluss der radioaktiven Materialien sollte über mindestens zwei voneinander unabhängige, ständige Barrieren erfolgen. Als erste Barriere sollten die Brennstoffhüllen gegen Alterungseffekte geschützt sein. Zudem sollte das für den Einschluss wirksame Gesamtsystem überwacht werden, um Zustände zu erkennen, die Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Einschlusses erfordern (vgl. (IAEA, 2012b, S. 40)).

In Abhängigkeit vom Zwischenlagersystem sollten Filtersysteme vorhanden sein, um luftgetragene radioaktive Partikel zurückzuhalten und die durch die Partikel verursachte Strahlenbelastung auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. (vgl. (IAEA, 2012b, S. 41)). Des Weiteren sollten Vorkehrungen zur Überwachung radioaktiver Ableitungen aus einem Zwischenlager getroffen werden. Bei der Auslegung der Lüftungssysteme sollten neben einer möglichen Anhäufung brennbarer bzw. explosionsfähiger Gase außerdem auch eventuell vorhandene korrosionswirksame Gase berücksichtigt werden, die die sicherheitsrelevanten Komponenten schädigen könnten (vgl. (IAEA, 2012b, S. 40 u. 46)).

Abschirmung. Das Design eines Zwischenlagers sollte den Strahlenschutz für die Beschäftigten, die Bevölkerung und die Umwelt, sowohl in Übereinstimmung mit internationalen Empfehlungen – die IAEA nennt in diesem Zusammenhang IAEA GSR-3 und IAEA SF-1 – als auch mit der nationalen Gesetzgebung, gewährleisten (vgl. (IAEA, 2012b, S. 40)). Die Handhabung des abgebrannten Kernbrennstoffs und des Behälters sollte in Bereichen erfolgen, in denen wichtige Parameter wie Temperaturen,

Verunreinigungen oder die Strahlenexposition kontrolliert werden. Für den Strahlenschutz der Beschäftigten sollten diese Bereiche mit entsprechenden Dosimetern ausgestattet werden (vgl. (IAEA, 2012b, S. 40f)). In den überwachten Bereichen soll mit fest installierten, mit Alarmen ausgestatteten und kontinuierlich messenden Instrumenten die Dosisleistung ermittelt und unmissverständlich angezeigt werden (vgl. (IAEA, 2012b, S. 47)). Darüber hinaus sollte vermieden werden, dass Betriebsräume nur über den Lagerbereich erreicht werden können (vgl. (IAEA, 2012b, S. 42)). So kann eine unnötige Strahlenbelastung der Mitarbeiter durch das Betreten des Lagerbereichs von vornherein vermieden werden. Es sollten geeignete Abschirmungsmaßnahmen für Normal- und Störfallbedingungen gewählt werden, wobei Durchdringungen z. B. für Durchführungen von Leitungen oder Öffnungen für Tore auch im Sinne des Strahlenschutzes ausgebildet werden sollten. Berücksichtigt werden sollten außerdem die radiologischen Auswirkungen von Aktivierungsprodukten (vgl. (IAEA, 2012b, S. 41)).

Unterkritikalität. Für Zwischenlagersysteme ist die Unterkritikalität unter allen denkbaren Umständen aufrechtzuerhalten (vgl. (IAEA, 2012b, S. 36)). Die Kritikalität eines Systems lässt sich über den Multiplikationsfaktor k ausdrücken:

$$k = \frac{\text{Zahl der Spaltungen einer Neutronengeneration}}{\text{Zahl der Spaltungen der vorhergehenden Neutronengeneration}}$$

Ist $k < 1$, spricht man von einem unterkritischen Zustand. Die Kettenreaktion nimmt ab oder wird gestoppt. Wenn $k = 1$ ist, wird der Zustand als kritisch bezeichnet. Im überkritischen Bereich ($k > 1$) steigt die Anzahl der Kettenreaktionen an (vgl. (Volkmer, 2013, S. 43f)). Dieser Zustand darf unter keinen Umständen eintreten – k darf die Kritikalitätsgrenze 1 nicht erreichen und muss stets kleiner 1 sein. Ein wichtiger Parameter für die Einhaltung der Unterkritikalität in einem Zwischenlager ist die räumliche Anordnung der radioaktiven Reststoffe, mithilfe derer ein Erreichen der Kritikalitätsgrenze unter Normal- und Störfallbedingungen verhindert werden soll (vgl. (IAEA, 2012b, S. 36)). In den Fällen, in denen die geometrische Anordnung des bestrahlten Kernbrennstoffs alleine nicht ausreicht, können zusätzlich z. B. fest installierte Neutronenabsorber eingesetzt werden. Durch den Entwurf sollte sichergestellt sein, dass diese nicht abgetrennt oder entfernt werden können. Darüber hinaus sollten Alterungs- und Korrosionseffekte sowie Handhabungseinflüsse berücksichtigt werden (vgl. (IAEA, 2012b, S. 36)). Zudem sollten

die Ereignisketten, die unter Betriebs- und Störfallbedingungen zu einer Erhöhung des Kritikalitätspotentials führen könnten, untersucht und bewertet werden. Erforderlichenfalls müssen Gegenmaßnahmen vorgesehen werden, um solche Zustände zu vermeiden (vgl. (IAEA, 2012b, S. 37)).

Wärmeabfuhr. Alle thermischen Lasten, die durch die Nachzerfallswärme der hoch radioaktiven Reststoffe induziert werden, sollten im Entwurfsprozess angemessen berücksichtigt werden. Typische zu berücksichtigende Aspekte sind:

- “(a) Thermally induced stresses;
- (b) Internally and externally generated pressures;
- (c) Heat transfer requirements;
- (d) Evaporation/water make-up requirements;
- (e) The effect of temperature on subcriticality” (IAEA, 2012b, S. 36).

Dementsprechend müssen Zwischenlager über ein angemessen leistungsfähiges und zuverlässiges System zur Wärmeabfuhr verfügen. Bei der Auslegung sollen nicht nur stationäre Zustände betrachtet, sondern auch Handhabungs- und Transportaktivitäten berücksichtigt werden (vgl. (IAEA, 2012b, S. 39)). Die Auslegungsgrundlage für den stationären Zustand soll das vollbeladene Zwischenlager unter Berücksichtigung der Abklingzeit und des Abbrandes der Reststoffe sein (vgl. (IAEA, 2012b, S. 39)). Die Wärmeabfuhr sollte nach Möglichkeit durch ein passives System gewährleistet werden, das durch die Energie der radioaktiven Reststoffe angetrieben wird (vgl. (IAEA, 2012b, S. 29)).

Handhabbarkeit / „Rückholbarkeit“. Schon in der Entwurfsphase eines Zwischenlagers sollte gezeigt werden, dass gemäß Entwurfskriterien und Anforderungen der nationalen Regulierungsbehörde Betrieb und Stilllegung sicher möglich sind (vgl. (IAEA, 2012b, S.31)). Die Möglichkeit zur Rückholbarkeit und Handhabbarkeit für eine möglicherweise notwendige Umverpackung bzw. Umkonditionierung sollte im Entwurfsstadium eines Zwischenlagers berücksichtigt werden (vgl. (IAEA, 2012b, S. 42)). Die Handhabungsinstrumente sollten mit dem Ziel der Minimierung von Unfallwahrscheinlichkeiten ausgelegt werden, wie z. B. durch Geschwindigkeitsbegrenzungen bei der Bewegung von bestrahltem Kernbrennstoff. So sollte beispielsweise der zufällige Absturz bei der Verwendung von Hebevorrichtungen auch im Falle eines Stromausfalls weitestgehend ausgeschlossen werden können (vgl. (IAEA, 2012b, S. 42f)) und dennoch die Funktionalität der Einschluss- und Abschirmungswirkung eines Behälters für den Fall des Eintretens nachgewiesen werden. Des Weiteren

soll durch einen Absturz kein signifikanter Schaden an Kernbrennstoff und Zwischenlager entstehen können, der möglicherweise auch dessen Bergung verhindern könnte (vgl. (IAEA, 2012b, S. 44f)).

Das Zwischenlager sollte derart betrieben werden, dass die Handhabbarkeit auch am Ende der geplanten Betriebszeit sichergestellt ist und eine Überführung des bestrahlten Kernbrennstoffs in den nachgeschalteten Entsorgungsschritt möglich ist (vgl. (IAEA, 2012b, S. 64)). Zudem sollten Maßnahmen zur Aufrechterhaltung bzw. Gewährleistung des sicheren Einschlusses von gealtertem bzw. beschädigtem radioaktiven Material vorgesehen werden (vgl. (IAEA, 2012b, S. 64)).

Leitlinien der WENRA

Die Western European Nuclear Regulators Association (WENRA) wurde 1999 gegründet, um die Zusammenarbeit der nationalen Atomaufsichtsbehörden in der Europäischen Union und der Schweiz zu fördern und um eine unabhängige Kontrollmöglichkeit für EU-Institutionen zu schaffen. Im Wesentlichen sollten gemeinsame Ansätze für die nukleare Sicherheit und deren Aufsicht sowie zur Förderung der Harmonisierung von Verfahren entwickelt werden. Im Gründungsjahr zählten noch 10 Länder zur WENRA. Seit 2003 sind insgesamt 17 Staaten Mitglied: 16 aus der EU und die Schweiz. Zudem haben weitere 8 Staaten Beobachterstatus. Die einzelnen Staaten werden innerhalb der WENRA durch die Leiter der jeweiligen nationalen Aufsichtsbehörden vertreten (vgl. www.wenra.org).

Die Arbeitsgruppe zu Abfällen und Rückbau (Working Group on Waste and Decommissioning (WGWD)) der WENRA adressiert u. a. die Zwischenlagerung hoch radioaktiver Reststoffe. Im Dezember 2005 wurde erstmals ein Dokument veröffentlicht (WENRA, 2005), in dem auf der Grundlage der IAEA Safety Standards sogenannte Safety Reference Levels definiert werden. Nachfolgend wird der Charakter eines Safety Reference Levels am Beispiel des Safety Reference Levels 45 aufgezeigt:

“S-45: The extent of the program for maintenance, periodic testing or inspection of SSCs [Structures, Systems and Components, Anmerk. d. Verf.] shall be in accordance with the facility safety case.

Related IAEA safety standards: The frequency for maintenance, calibration, periodic testing and inspection of SSCs shall be in accordance with the facility licensing documentation (NS-R-5; para 9.30)“ (WENRA, 2014, S. 41).

Die Mitglieder der WENRA haben untereinander vereinbart, die Safety Reference Level in nationale Regelungen umzusetzen. Hierzu wurde u. a. ein Benchmark-Test durchgeführt, in dem die Mitgliedsstaaten ihre nationalen Regelwerke bezüglich der Berücksichtigung der Safety Reference

Level überprüfen und bei Nichtberücksichtigung entsprechende Änderungen der Regelwerke veranlassen (WENRA, 2014, S. 59ff). In Deutschland wurden im Rahmen des Benchmark-Tests beispielsweise Defizite im Regelbereich des Alterungsmanagements erkannt (WENRA, 2014, S. 83), woraufhin das damals zuständige Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit am 25.11.2009 eine Kommission mit der Erstellung einer Leitlinie zur periodischen Sicherheitsüberprüfung beauftragte (vgl. <http://www.entsorgungskommission.de>).

Nationale Leitlinien

Nationale Leitlinien zur Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle stehen in der Regelwerkspyramide in Abb. 5.106 zwischen der Gesetzgebung und der industriellen Erfahrung, die zusammen mit den Ergebnissen aus der Forschung und Entwicklung das Fundament der nationalen Leitlinien bildet. Alle oben aufgeführten Zwischenlagersysteme erfüllen die grundsätzlichen Schutzziele der IAEA, jedoch in unterschiedlicher Quantität. Sie sind auch unterschiedlich im Hinblick auf Wartungs- und Überwachungsmöglichkeiten zu bewerten. Nationale Leitlinien beziehen sich folglich vielfach auf die industrielle Praxis im jeweiligen Land und berücksichtigen das vorhandene System bei der Ausarbeitung der Empfehlungen.

In der Regel werden Leitlinien von den Aufsichtsbehörden oder den übergeordneten Ministerien bereitgestellt. Häufig werden zur Erstellung der Dokumente Experten aus Wissenschaft und Industrie konsultiert. In Deutschland berät die im Jahr 2008 gegründete Entsorgungskommission (ESK) das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) und hat im Rahmen ihres Beratungsauftrags zur Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle die folgenden Leitlinien erstellt:

- Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern (ESK, 2013)
- ESK-Leitlinien zur Durchführung von periodischen Sicherheitsüberprüfungen und zum technischen Alterungsmanagement für Zwischenlager für bestrahlte Brennelemente und Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (ESK, 2014)

Die ESK hat mit ihrem Beratungsauftrag zur Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle einen Teil der ehemaligen Beratungsaufgaben der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) übernommen. Die Leitlinie ESK (2013) geht aus der Leitlinie RSK (2001) hervor und wurde von der ESK u. a. im Rahmen des WENRA Benchmark-Tests angepasst. Das Dokument

folgt in seinem Aufbau zunächst den o. g. Schutzzielen „Einschluss radioaktiver Stoffe, Kritikalitätssicherheit, Wärmeabfuhr und Abschirmung ionisierender Strahlung“, darauffolgend werden technische und organisatorische Anforderungen thematisiert (Strahlenschutz, Bauliche Einrichtungen, Technische Einrichtungen, Störfallanalysen, Eigenständigkeit des Zwischenlagers, Qualitätssicherung, Betrieb des Zwischenlagers, Notfallschutz, PSÜ, Beendigung der ZWL). Der Titel der Leitlinie greift bereits das vorhandene System „Behälter“ auf. Die Empfehlungen beziehen sich entsprechend auf die Lagerung von bestrahlten Brennelementen und hoch radioaktiven, verglasten Abfällen, verpackt in Transport- und Lagerbehältern, die wiederum in Industriehallen abgestellt sind.

In der Schweiz werden bestrahlte Brennelemente und verglaste Abfälle ebenfalls in Transport- und Lagerbehältern verpackt und in Industriehallen abgestellt. Die Leitlinien aus der Schweiz und Deutschland können einander somit gut gegenübergestellt werden. Das ENSI stellt im Gegensatz zur ESK allerdings zwei Leitlinien zur Verfügung, die sich zum einen auf die Anforderungen von Transport- und Lagerbehältern (HSK, 2008) und zum anderen auf die Auslegung der Zwischenlagergebäude und der technischen Einrichtungen (ENSI, 2015) beziehen. Dem Zwischenlagergebäude werden nach (ENSI, 2015, S. 3) drei wesentliche Funktionen zugewiesen:

1. Aufnahme des Lagergutes und der technischen Ausrüstungen,
2. Schutz des Lagergutes vor Witterungseinflüssen,
3. Schutz von Mensch und Umwelt vor den Gefahren, welche vom Lagergut ausgehen können.

Besondere Ausführungen zu langfristigen Zwischenlagern. In den meisten Ländern wurde ein Zwischenlagerungszeitraum von weniger als 50 Jahren angesetzt. Die Normen beziehen sich dann in der Regel auf diesen Genehmigungszeitraum, so dass keine besonderen Anforderungen für eine langfristige Zwischenlagerung aus diesen Normen hervorgehen. In Deutschland soll die Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und hoch radioaktiver Abfälle beispielsweise nach § 6 Abs. 5 AtG „40 Jahre nicht überschreiten“. Die Leitlinie (ESK, 2013) ist in ihrer Ausgestaltung folglich nur auf diesen Zeitraum ausgerichtet.

Aufgrund stockender oder gescheiterter Endlagerprojekte haben sich aber einige Staaten für die Vorgabe entschieden, langfristige Zwischenlager, mit einer technischen Nutzungsdauer von mindestens 100 Jahren, in ihre Entsorgungsstrategie einzubetten (Köhnke u. a., 2017a). Die Gründe

dafür können sehr unterschiedlich sein. In Frankreich wird beispielsweise auf den untrennbaren Zusammenhang zwischen Zwischen- und Endlagerung verwiesen (ANDRA, 2015, S. 2, eigene Übersetzung). Die Zwischenlagerung erfüllt mehrere Funktionen in Komplementarität mit der reversiblen Tiefenlagerung:

- sie erlaubt die Verwaltung produzierter hoch aktiver Abfälle (HA) und mittel radioaktiver Abfälle langer Lebensdauer (MAVL) bis zur Inbetriebnahme des geologischen Tiefenlagers,
- sie trägt zur Flexibilität für den Bau und die Inbetriebnahme des geologischen Tiefenlagers bei,
- sie erlaubt eine Phase der Abnahme der Radioaktivität vor der Einlagerung, die in technischer Hinsicht für gewisse Abfälle notwendig ist, insbesondere für die Wärme entwickelnden, hoch radioaktiven Abfälle,
- sie bietet die Möglichkeit, die Entwicklung der Primärbehälter (CSD-V, AVM etc.) vor deren Einlagerung zu überwachen, ,
- sie ermöglicht den Umgang mit gegebenenfalls aus einem Endlager zurückgeholten Behältern.

Der Entscheidung, Zwischenlager für eine mindestens 100-jährige Nutzungsdauer zu konzipieren, ging ein über 25 Jahre systematisch vorangetriebenes Forschungsprogramm voraus, indem die Möglichkeit einer langfristigen Zwischenlagerung (100–300 Jahre) als einer von drei Forschungszweigen untersucht wurde (Köhnke u. a., 2017b). Die ANDRA erstellte für das französische Ministerium für Ökologie, nachhaltige Entwicklung und Energie im Rahmen des Nationalen Plans zur Verwaltung von radioaktiven Materialien und Abfallstoffen (2013–2015) auf Grundlage der Forschungsergebnisse ein technisches Dokument⁷³, das im Besonderen die konzeptionellen Anforderungen einer mindestens 100-jährigen Zwischenlagerung adressiert. Wichtige Ergebnisse mit Bezug zur Bautechnik sind in Tabelle 5.16 aufgeführt. Für einen ausführlicheren Überblick sei auf Köhnke u. a. (2018) verwiesen. Auch in Großbritannien sollen neu errichtete Zwischenlager fortan für eine mindestens 100-jährige Nutzungsdauer ausgelegt werden. Zur Unterstützung der konzeptionellen Umsetzung solcher Lager wurde eine Richtlinie (NDA, 2017) erstellt. Zu Beginn der Richtlinie werden sechs Leitprinzipien definiert:

⁷³Frei übersetzt: Empfehlungen für die Konzeptionierung von Zwischenlagern in Verbindung mit der Komplementarität der geologischen Tiefenlagerung

1. Cradle-to-grave lifecycle
2. Right Package ↔ Right Store
3. Minimising waste generation
4. Prevention is better than cure
5. Foresight in design
6. Effective knowledge management

Die beiden Prinzipien *Prevention is better than cure* und *Foresight in design* zielen im Kern darauf ab, allen Lagerkomponenten eine Lebensdauer zuzuordnen. Damit soll erreicht werden, dass notwendige Handlungen vor dem Ausfall einer bestimmten Komponente vorbereitet sind und bereits im Entwurfsprozess über die Machbarkeit eines Komponentenaustauschs nachgedacht wurde. Die dazu notwendigen Arbeitsschritte müssen grundsätzlich realisierbar sein und unter den Aspekten des im Strahlenschutz geltenden ALARA-Prinzips (as low as reasonably achievable) geplant werden. In den o. g. Dokumenten der IAEA und WENRA lassen sich ebenfalls Aspekte identifizieren, die zwar nicht direkt auf die langfristige Zwischenlagerung Bezug nehmen, bei entsprechender Umsetzung allerdings zu einer längeren technischen Nutzungsdauer beitragen, z. B. in (IAEA, 2006b, S. 10): „(e) The waste form and its container should be resistant to degradation;

(f) The waste storage environment should optimize the lifetime of the waste package;

(m) The waste packages should be able to be inspected;

(n) The waste packages should be retrievable for inspection or reworking;

(o) The lifetime of the waste storage building should be appropriate for the storage period prior to disposal of the waste;“ Weitere wichtige Ergebnisse mit Bezug zur Bautechnik sind in Tabelle 5.16 aufgeführt.

5.7.3 AP 7.2 „Probabilistisches, monitoringbasiertes Sicherheits- und Life-Cycle2-Konzept“

Kurzbeschreibung der AP-Ziele. Das Multibarrierensystem Zwischenlager besteht aus zahlreichen Komponenten, die jeweils unterschiedliche Sicherheitsfunktionen im Gesamtsystem übernehmen. Zur Entwicklung eines Sicherheits- und Life-Cycle-Konzepts wurden zunächst etablierte Methoden für Ingenieurbauwerke herangezogen und diese hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf langfristig ausgelegte Zwischenlager überprüft.

Insbesondere die Interaktion zwischen materialspezifischer und geometrischer Ausgestaltung war im Hinblick auf den langfristigen Normalbetrieb (Wärmeabfuhr, Alterungsbeständigkeit, Instandhaltungsaufwand etc.) und den Widerstand gegen extreme Einwirkungen (Erdbeben, Flugzeugabsturz etc.) Gegenstand der Untersuchungen.

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse. Im Regelfall wird als Konstruktionsbaustoff für Zwischenlagerbauwerke Stahlbeton, vereinzelt bei Fertigteilkonstruktionen z. B. für Dachbinder auch Spannbeton, eingesetzt. Nach dem in den Eurocodes (DIN EN 1990 bis -9) verankerten bautechnischen Sicherheitskonzept werden zur Bauwerksbemessung mögliche mechanische Einwirkungen, wie z. B. Verkehrslasten, Wind oder Schnee, sowie deren Kombinationen rechnerisch den Bauwerkswiderständen gegenübergestellt. Eine Besonderheit in der Kerntechnik sind zusätzlich zu berücksichtigende deterministische Einwirkungsszenarien, wie eine Explosion oder der Absturz eines schnell fliegenden Militärflugzeugs, die z. B. in Deutschland in den ESK-Leitlinien (ESK, 2013) beschrieben sind. Hinzu kommen mögliche Einwirkungen im Zusammenhang mit Störmaßnahmen oder sonstigen Einwirkungen Dritter (SEWD), die in als Verschlussache eingestuften Dokumenten beschrieben sind und daher nur am Rande betrachtet wurden. Für eine vertiefte Diskussion der extremen Einwirkungen auf Zwischenlagerbauwerke und damit verbundener bautechnischer Herausforderungen wird auf Reichardt (2017) verwiesen. Darin werden neben den besonderen Baustoffeigenschaften unter schnell ablaufenden Belastungszuständen u. a. auch wichtige Aspekte für den konstruktionsbedingten Bauwerkswiderstand, wie die Wahl günstiger Bauwerksformen und Konstruktionsarten, thematisiert.

Um die Zuverlässigkeit der betrachteten Bauwerkskomponenten über sehr lange Zeiträume abschätzen zu können, sind neben den zu erwartenden Einwirkungen auch Veränderungen der Widerstände, insbesondere der Baustoffeigenschaften, zu erfassen. Eine besondere Herausforderung ist in diesem Zusammenhang die Quantifizierung des Zustands von Beton über sehr lange Nutzungszeiträume: „Beton ist ein hochkomplexer Werkstoff, dessen Eigenschaften von zahllosen Faktoren [...] abhängig sind [...]. Die Eigenschaften [...] legen den Schluss nahe, dass eine Vorhersage über das Verhalten von Beton über sehr lange Zeiträume nicht zuverlässig gemacht werden kann“ (Ellinger u. a., 2010, S.176f). Zur Verbesserung dieser werkstoffspezifischen Prognoseunsicherheit wurden zunächst besondere Randbedingungen in Zwischenlagern für hoch radioaktive Reststoffe identifiziert und daraus modifizierte Randbedingungen für langfristige Oberflächenlager abgeleitet. Der Stand der Forschung zur rechneri-

schen Modellierung von Alterungsprozessen sowie zum Monitoring der zeitlichen Zustandsveränderung von Bauwerkskomponenten wurde fortlaufend verfolgt und in die Betrachtungen einbezogen.

Die ingenieurmäßige Erfassung der Auswirkungen oben genannter extremer Einwirkungsszenarien kann man sich zum Beispiel über numerische Simulationen nähern. Hydrocodes ermöglichen dank leistungsfähiger Computertechnologie die Simulation (hoch-)dynamischer Belastungen. Beton und Betonstahl weisen bei sehr schnell ablaufenden Belastungszuständen, d. h. hohen Verformungsgeschwindigkeiten und Drücken, ein sich vom quasistatischen Fall unterscheidendes mechanisches Verhalten auf, das in kommerziellen FEM-Programmen wie LS-DYNA berücksichtigt werden kann. In generischen Beispielberechnungen von Impactvorgängen zeigte sich eine Empfindlichkeit der Berechnungsergebnisse gegenüber den Randbedingungen der Berechnung (Elementart und -netz, Kontaktformulierungen, Implementierung des Verbunds zwischen Stahl und Beton, Lagerungsbedingungen etc.), den Materialmodellen und deren Eingangsparametern. Umfangreiche Untersuchungen zur Validierung und Sensitivität numerischer Methoden sind beispielsweise in Heckötter u. Sievers (2012, 2016) zu finden. Zur Frage, wie sich für die die Auslegung von Langfristzwischenlagern Alterungs- und Korrosionseffekte bei der Bemessung methodisch berücksichtigen lassen sowie der Frage, wie groß deren Einfluss auf den Widerstand gegenüber den lokalen Auswirkungen von Stoßbeanspruchungen sein kann, werden derzeit Ansätze in einem Dissertationsprojekt am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) entwickelt.

Dauerhaftigkeitsrelevante Einwirkungen

Neben mechanischen sind die Baustoffe physikalisch-chemischen Einwirkungen ausgesetzt, die über lange Zeiträume Veränderungen der Baustoffeigenschaften hervorrufen können. Dauerhaftigkeitsrelevante Beanspruchungen entstehen aus atmosphärischen Einwirkungen (Temperatur, Frost-Tau-Wechsel, Beregnung etc.), Böden und Grundwässern sowie den Randbedingungen aus dem Bauwerksbetrieb. Eine übersichtliche Zusammenstellung der Alterungsmechanismen mit Bezug zur Kerntechnik enthält z. B. das IAEA TECDOC-1025 (IAEA, 1998). Relevante Mechanismen mit Bezug zur Langfristzwischenlagerung werden in (ANDRA, 2015) beschrieben.

Einer der wichtigsten Alterungsmechanismen für Stahlbetonbauwerke ist die Carbonatisierung, die durch das in den Beton eindringende Kohlenstoffdioxid aus der Umgebungsluft verursacht wird. Die im Zementstein

stattfindende chemische Reaktion ist für die mechanischen Eigenschaften von Beton selbst von untergeordneter Bedeutung, in der Konsequenz verliert jedoch der Betonstahl seinen im alkalischen Milieu natürlich vorhandenen Korrosionsschutz (Passivierung). Kritisch sind vor diesem Hintergrund auch durch die Ausgangsstoffe bereits vorhandene oder in den Beton eindringende Chloridionen zu bewerten (besonders in Meeresnähe oder im Sprühnebelbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen), da diese den Betonstahl ebenfalls angreifen und bei lokal hohen Chloridgehalten zu stark ausgeprägter, lokaler, von außen schlecht erkennbarer Korrosion (Lochfraß) führen können.

Neben dem Betonstahl werden auch die Eigenschaften des Betons selbst durch chemische Angriffe beeinträchtigt. Besonders Treibreaktionen können für Langfristzwischenlager eine Rolle spielen: Die Volumenexpansion der Reaktionsprodukte führt zu Gefügespannungen, die dauerhaftigkeitsmindernde Risse zur Folge haben können. Die beiden wichtigsten Treibreaktionen sind die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) und das Sulfattreiben.

Weitere wichtige Einwirkungen sind durch die Randbedingungen des Betriebs vorgegeben, wobei besonders erhöhte Betriebstemperaturen sowie Temperatur- und Feuchtegradienten zu nennen sind. Durch den Wärmeeintrag aus der Nachzerfallswärme der Reststoffe liegen Randbedingungen vor, die in der Regel zur Erhöhung der Transportkoeffizienten und der Löslichkeit metastabiler Betonphasen sowie zur Beschleunigung chemischer Reaktionen führen. Das zur Abfuhr der Nachzerfallswärme vorherrschende Lüftungssystem („Naturzug“) in Zwischenlagern führt zudem zu instationären klimatischen Bedingungen in den Anlagen. Temperatur- und Feuchtegradienten erzeugen unterschiedliche Dehnungen in den Bauteilen und können Risse nach sich ziehen, siehe hierzu auch ANDRA (2015).

Prognose der Werkstoffentwicklung. Für die Modellierung von mineralischen Baustoffen werden neben phänomenologischen und naturwissenschaftlich-deterministischen Modellen (z. B. Schmidt-Döhl (1996)), probabilistische Modelle (z. B. fib (2015)) zur Abdeckung von Unsicherheiten verwendet, die eine statistische Beschreibung von Einwirkungen und Widerständen beinhalten und somit die Quantifizierung einer technischen Zuverlässigkeit erlauben. Ebenso sind Kombinationen (z. B. Rigo (2005)) der verschiedenen Modellansätze möglich. Im Rahmen der durchgeführten Recherchen konnten nur wenige wissenschaftliche Arbeiten identifiziert werden, die sich der Zustandsprognose von Betonbauteilen unter Berücksichtigung der besonderen Randbedingungen in Zwischenlagern

widmen (z. B. Kamali u. a. (2008); Drouet (2011)). Zum Einfluss erhöhter Temperaturen auf dauerhaftigkeitsrelevante Transportprozesse im Beton wird am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz derzeit ein Dissertationsprojekt bearbeitet.

Mess- und Monitoringmethoden. Für den langfristig sicheren Betrieb eines Zwischenlagers hat der Einsatz von Mess- und Monitoringmethoden große Bedeutung. Die Methoden werden für Ingenieurbauwerke bereits seit mehreren Jahrzehnten entwickelt, so dass im Rahmen der Bearbeitung des Arbeitspaketes auf einen weit entwickelten Stand der Technik zurückgegriffen werden konnte (siehe Schmidt-Döhl (2013); DBV (2014)). Es wurden Informationen aus einer Vielzahl an Veröffentlichungen zur Bauwerksüberwachung im Allgemeinen (Mess- und Monitoringtechnik, Hochbau, Brücken etc.), aber auch aus Literatur zur bautechnischen Überwachung von Kernkraftwerken im Besonderen, wie z. B. dem oben bereits genannten IAEA (1998), ausgewertet.

Die meisten Werkstoffeigenschaften können nicht direkt ermittelt, sondern müssen mit indirekten Methoden bestimmt werden, d. h. die gemessene Größe steht im Zusammenhang mit einer Werkstoffeigenschaft, muss aber noch in diese umgerechnet werden (z. B. Stromstärke in Dehnung). Der Kalibrierung, Validierung und Zuverlässigkeit von insbesondere neuen Verfahren kommt deshalb eine hohe Bedeutung im Rahmen eines Monitoringkonzepts zu. Neuere Methoden, die noch Gegenstand der Forschung sind, könnten aber gerade vor dem Hintergrund einer langfristigen Zwischenlagerung ein hohes Potential besitzen, sinnvoll in ein Monitoringkonzept eingebunden zu werden (Köhnke, 2017).

Anlagenbezogene Monitoring- und Life-Cycle-Konzepte

Anlagenbezogene Monitoring- und Life-Cycle-Konzepte können schon bei der Auslegung der technischen Komponenten, wie z. B. beim Baustoffdesign ansetzen, um bereits in frühen Planungsstadien auf einen möglichst geringen Instandhaltungsaufwand bzw. auf eine erhöhte Robustheit gegenüber Alterung und Korrosion hinarbeiten. Im Allgemeinen lässt sich die zeitliche Entwicklung von wesentlichen Baustoffeigenschaften in vielen Fällen zunächst anhand von Erfahrungswerten oder über Ingenieurmodelle abschätzen bzw. prognostizieren. Aktuelle Werte können dann nach der Errichtung anhand etablierter Methoden in situ am Bauwerk oder im Labor gemessen werden und mit der erwarteten Entwicklung abgeglichen werden. Kontinuierliche und diskontinuierliche Messungen bieten zudem die Möglichkeit, die verwendeten Prognosemo-

delle jeweils an den aktuellen Zustand anzupassen und darauf aufbauend aktualisierte Prognosen zu erstellen. Die Zuverlässigkeit der Prognose steigt mit jedem Messergebnis. Eine umfangreiche Zusammenstellung zu Ingenieurwerkzeugen des Life-Cycle Civil Engineering enthält beispielsweise Ahrens u. a. (2013).

Dauerhaftes Baustoffdesign für Beton. Zentrales Ziel für eine dauerhafte Auslegung von Beton- und Stahlbetonbauteilen ist die Begrenzung der Porenräume sowie Mikro- und Makrorisse, da diese als Transportwege das Eindringen von Wasser und schädlichen Stoffen, wie z. B. Kohlenstoffdioxid oder Chloridionen, ermöglichen.

Im Vergleich zum Zementstein wird die Gesteinskörnung in Normalbeton im Allgemeinen als für Flüssigkeiten und Gase undurchlässig angesehen. Die für das Eindringen dieser Medien maßgebende Kapillarporosität des Zementsteins kann durch einen niedrigen Wasser-Zement-Wert (W/Z-Wert) begrenzt werden. Nach ANDRA (2015) wird als W/Z-Wert ein Wert von unter 0,45 empfohlen. Sofern betontechnologische Randbedingungen und Verarbeitbarkeit es zulassen, sollte der Volumenanteil des Zementsteins im Beton möglichst gering sein. Weiterhin ist generell eine hohe Gefügedichtigkeit des Betons anzustreben, indem eine im Hinblick auf eine hohe Packungsdichte optimierte Korngrößenverteilung und ggf. zusätzlich Mikrofüller (z. B. fein aufgemahlene Gesteinsmehle), verwendet werden. Weitere Hinweise zu einer im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit günstigen Wahl der Gesteinskörnung (Korngeometrie, Größtkorn etc.) können beispielsweise Kustermann (2005) entnommen werden.

Zur Vermeidung von Treibreaktionen können speziell abgestimmte Zemente verwendet werden (NA- (niedriger wirksamer Alkaligehalt) und HS-Zemente (hoher Sulfatwiderstand)), in denen der Gehalt einzelner für die Treibreaktion benötigter Partner begrenzt ist. Zur sicheren Vermeidung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion sollte außerdem der Einsatz alkaliresistenter Gesteinskörnung geprüft werden, nach ANDRA (2015) wird z. B. der Einsatz kalkhaltiger Gesteinskörnung empfohlen.

Um die Bildung von Mikro- und Makrorissen infolge bei der Erhärtung entstehender Hydratationswärme des Zementes zu begrenzen, können Zemente niedriger Hydratationswärmeentwicklung (vergleichsweise grob gemahlen, LH-Zemente) verwendet werden, wobei der Carbonatisierungswiderstand der eingesetzten Zemente ebenfalls zu berücksichtigen ist. Temperaturgradienten innerhalb erhärtender Bauteile sollte beispielsweise durch thermisch isolierende Schalungen oder aktive Kühlung entgegengewirkt werden. Verdichtungsstellen sind als Ausgangspunkte für Mikrorisse durch sorgfältige Verdichtung des Frischbetons

zu begrenzen. Große Bedeutung hat außerdem eine sorgfältige, frühzeitig ansetzende, kontinuierliche und ausreichend lange Nachbehandlung zum Schutz der Bauteiloberflächen gegen Austrocknung und extreme Temperaturen, Erschütterungen sowie chemische Angriffe. Da im Verhältnis zur Sollfestigkeit vergleichsweise frühzeitig belastete Bauteile zu stärkerer Mikrorissbildung neigen, sollte der Bauablauf auch vor diesem Hintergrund geplant werden.

Dauerhaftes Baustoffdesign für Betonstahl. Neben der Auslegung des Betons ist ein weiterer Aspekt der dauerhaften Anlagenauslegung der Korrosionsschutz für den Bewehrungsstahl. Für Langfristzwischenlager kann z. B. die Betondeckung im Vergleich zu konventionellen Bauwerken (nach deskriptivem Konzept zwischen 20 bis 60 mm) vergrößert werden. Deren Dimensionierung ist auch mit den verfügbaren Ingenieurmodellen mit Unsicherheiten behaftet (siehe Abschnitt auf Seite 685). Im für mindestens 100 Jahre Betriebsdauer ausgelegten HABOG-Gebäude, das in unmittelbarer Nähe zum Meer steht (Chloridbelastung), wurde entsprechend Betreiberangaben eine Betondeckung von 100 mm realisiert.

Zusätzlich wird in den Niederlanden außen ein Oberflächenschutzsystem verwendet, dessen regelmäßige Erneuerung alle 20 Jahre auch für kommunikative Zwecke verwendet wird, siehe hierzu Budelmann u. a. (2017). Oberflächenschutzsysteme können je nach Aufbau den Zutritt wässriger Lösungen und von Gasen bremsen. Die Wirksamkeit der Systeme kann jedoch u. a. durch Rissbildung im Beton sowie im Oberflächenschutzsystem selbst beeinträchtigt werden. Die Erneuerung in regelmäßigen Abständen erfordert zudem Arbeiten im Strahlenfeld des Zwischenlagers. Gleichzeitig ist eine konkrete Prognose zur Lebensdauer von Oberflächenschutzsystemen bisher noch nicht möglich (vgl. Orłowsky (2012)), sodass der tatsächliche Instandhaltungsaufwand schwer abzuschätzen ist.

Weitere Maßnahmen setzen nicht am Beton, sondern an der Bewehrung an und können grundsätzlich aus Epoxidharzbeschichtungen, der Feuerverzinkung des Betonstahls oder dem Einsatz nichtrostender Betonstähle bestehen. Der Korrosionsschutz wird mit der Errichtung eingebaut und steht danach passiv zur Verfügung. Jedoch ist der Einsatz korrosionsgeschützter Stähle vor dem Hintergrund der Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften und die Materialkosten zu prüfen. Die Verwendung sollte vorwiegend punktuell erfolgen und stets vor dem Hintergrund der Schutzzielrelevanz sowie der Bauteilexposition abgewogen werden.

Anlagendesign unter besonderer Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit.

Abgesehen von der (beim deutschen Konzept bereits durch den Behälterkörper stark abgeschirmten) ionisierenden Strahlung und dem ständigen Zutritt von Außenluft durch die Lüftungsöffnungen im Gebäude ist die Wärmebelastung und deren zeitliche Veränderung der wesentliche Parameter für die Formulierung erweiterter Anforderungen an langfristig ausgelegte Zwischenlager. Nach den ESK-Leitlinien sollte die Nachzerfallswärme passiv abgeführt werden. Für eine langfristige Zwischenlagerung kann aus dieser Anforderung ein Nachteil für die Dauerhaftigkeit der Konstruktionsmaterialien entstehen. Sie könnte für eine längerfristige Zwischenlagerung erweitert werden auf: „Die Wärme soll so abgeführt werden, dass die Konstruktionswerkstoffe über den gesamten Nutzungszeitraum möglichst keine nennenswerten Veränderungen der geforderten Eigenschaften erfahren und demnach keine aufwändigen Instandsetzungsmaßnahmen anfallen.“ Dies betrifft zum einen die maximale Temperatur im Stahlbeton – laut ANDRA (2015) sollten die Temperaturen in den Stahlbetonbauteilen demnach vergleichsweise niedrige 65°C nicht überschreiten. In der Richtlinie HSK (2008) werden beispielsweise maximal zulässige Temperaturen von 120°C an der Behälteroberfläche und 100°C an den Bauteiloberflächen des Gebäudes vorgegeben.

Für ein dauerhaftes Bauwerk ist darüber hinaus nicht nur die sichere Abfuhr der Nachzerfallswärme in einem vollbeladenen Lager nachzuweisen, sondern es sind auch Zustände zu identifizieren, die beispielsweise bei einem teilbeladenen Lager zum Tauwasserausfall führen und somit ebenfalls dauerhaftigkeitsmindernd wirken können.

Neben der Beheizung des Lagerbereichs ist der segmentäre Aufbau des Lagers ein möglicher Lösungsansatz. Die Reststoffe könnten in Abhängigkeit von ihrer Wärmestromdichte in unterschiedlichen Umgebungsbedingungen gelagert werden und beispielsweise während der ersten 30 Jahre in der Zwischenlagerung durch passive Wärmeabfuhr gekühlt und danach in aktiv klimatisierte Bereiche umgelagert werden, siehe hierzu ANDRA (2015). Mit einem solchen segmentären Aufbau ließen sich ggf. auch Lagersegmente räumen, wenn darin Inspektionen durchgeführt oder Instandsetzungsarbeiten erforderlich werden.

Für die dauerhafte Auslegung eines Zwischenlagers, seiner Bauteile und der verwendeten Baustoffe wird ein kombinierter Lösungsansatz empfohlen. CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) können als Hilfswerkzeug schon im frühen Planungsstadium zur Ermittlung der Temperatur- und Feuchtefelder beitragen. Aus den Simulationen können außerdem Informationen über nennenswerte Temperatur- und Feuchtegradienten in der Konstruktion gewonnen werden, die Mikro- und Ma-

krorisse implizieren können. Für die betroffenen Stellen können dann beispielsweise thermische Isolierungen geplant werden. Thermische Isolierungen sind wegen der Gefahr der Rissbildung jedoch auch für die Außenseiten zu prüfen. Zudem sollten die Außenseiten eines Zwischenlagerbauwerks vor direkter Beregnung und Sprühnebel geschützt werden, siehe hierzu auch ANDRA (2015).

Insgesamt gilt für eine gute Inspizierbarkeit, dass alle sicherheitsrelevanten Komponenten eines Zwischenlagersystems zugänglich sein sollten. Ein wichtiger Aspekt ist für deren Instandhaltung in diesem Zusammenhang auch die Zugänglichkeit der bei Bauwerken großer Abmessungen notwendigen Dehnungsfugen, vgl. ANDRA (2015).

Ein wichtiger Aspekt für das Anlagendesign ist auch, dass die Lebensdauer vieler Anlagenkomponenten unter der angestrebten Betriebsdauer der Anlage liegt, hierzu zählen z. B. elektrische Einrichtungen, Kommunikationssysteme, Handhabungssysteme etc. Schon bei der Anlagenauslegung ist es sinnvoll, regelmäßige Erneuerungs- oder Austauscharbeiten an Komponenten in Betracht zu ziehen, diese Arbeiten im Anlagendesign zu berücksichtigen (Zugänglichkeit, Hilfsmittel vorhalten, Größe von Türen beachten etc.) und diese konsequent, auch vor Erreichen der technischen Lebensdauer bzw. vor deren Versagen, durchzuführen, vgl. auch NDA (2017).

Monitoring in einem Langfristzwischenlager. Anhand der oben genannten CFD-Simulationen können in einem Lagersystem bereits in der Entwurfsphase die notwendigen Randbedingungen für ein bauteil- und baustoffbezogenes Alterungsmodell ermittelt werden. Darüber hinaus können kritische Stellen, die durch die Nachzerfallswärme nennenswert erwärmt werden, identifiziert werden. Zur Entwicklung eines anlagenbezogenen Monitoringkonzepts lässt sich aus den Ergebnissen auch ableiten, an welchen Stellen im Rahmen von Überwachungsmaßnahmen welche Parameter erhoben werden müssen, um die Alterung bzw. den Zustand des Bauwerks und im Weiteren der Behälter realitätsnah modellieren zu können. Ausgehend von Simulationsergebnissen und der Datenauswertung aus möglicherweise schon während der Errichtung installierten Sensoren (beispielsweise Temperatur- und Feuchtesensoren) sowie regelmäßigen Sichtprüfungen können weitergehende Untersuchungen mittels zerstörungsfreier, -armer oder zerstörender Prüfmethoden gewählt werden. Nach der Errichtung des Zwischenlagers und der Implementierung des Monitoringkonzepts, können darüber die messtechnisch gewonnenen Daten zur adaptiven Anpassung der Simulationswerkzeuge (vgl. Bruder (2007)) verwendet werden, sodass die Zuverlässigkeit der Pro-

gnose fortlaufend verbessert werden kann. Dadurch wird die Planungssicherheit erhöht und Degradationen bzw. notwendige Interventionen können rechtzeitig erkannt werden. Günstige Zeitpunkte für vorsorgliche Instandhaltungsmaßnahmen an der Konstruktion können auf dieser Basis zielgerichtet ausgewählt werden.

Die kritischen Bereiche und Bauteile, z. B. stark wärmebelastete Träger im Deckenbereich, sollten im Rahmen der Periodischen Sicherheitsüberprüfungen besondere Beachtung finden, ebenso aber auch Bereiche, in denen Tauwasserbildung zu erwarten ist: An diesen Stellen ist das Bauwerk besonders auf Rissbildung, übermäßige Verformungen (auch durch Baugrundsetzungen) oder Korrosionserscheinungen der Bewehrung (rötliche Verfärbungen auf der Betonoberfläche, Abplatzungen) zu untersuchen. In (ESK, 2014, S. 9) werden als Beispiele für solche Maßnahmen visuelle Inspektion, Funktionsprüfung, zusätzliche Sicherheitsnachweise und generische Untersuchungen genannt. Im Bauwerk selbst ist die regelmäßige visuelle Inspektion der Anlage ein wichtiges Instrument der Überwachung, die durch neuartige Monitoringwerkzeuge ergänzt werden kann. Nennenswerte Weiterentwicklungen dieser Werkzeuge sind u. a. durch große Fortschritte im Bereich der Mess- undameratechnik möglich geworden. Als Monitoringwerkzeuge stehen heute die vollautomatisierte Vermessung von Bauwerken, hochauflösende Kameras oder die Mikrocomputertomographie zur Verfügung, die die Erkennung ungünstiger Veränderungen des Bauwerkszustands unterstützen können, vgl. Köhler (2017). Unter Verwendung modernerameratechnik ließen sich neben der kontinuierlichen Datenaufzeichnung ggf. auch die Zeiträume begrenzen, in denen sich zum Zweck der Inspektion Personen im Kontrollbereich des Zwischenlagers aufhalten müssen.

Zusätzlich zur visuellen Überwachung sollten zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der Konstruktionswerkstoffe eigens hergestellte Rückstellproben im Zwischenlager aufbewahrt werden, die in einer (Zug-/Druck-)Prüfmaschine platziert werden können. Diese sollten während des Betriebs an repräsentativen Stellen (Strahlungsintensität, Wärmebelastung, relative Luftfeuchte) positioniert werden, vgl. ANDRA (2015). Auf Basis von Bohrkernen können daran nicht nur mechanische, sondern auch wichtige alterungsrelevante Parameter erhoben werden, wie beispielsweise die Carbonatisierungstiefe mittels Phenolphthaleinprüfung. Scans dieser Bohrkern in einem Mikro-CT können darüber hinaus weitere Informationen über den Zustand des Gefüges (z. B. Mikrorisse) geben.

Des Weiteren müssen Bauwerksabdichtungen und Außenschalen regelmäßigen Inspektionen unterzogen werden (Dachabdichtung, Oberflä-

chenschutzsysteme, Trapezbleche, Fassadenelemente etc.). Nach ANDRA (2015) ist die Lebensdauer für Abdichtungen auf etwa 50 Jahre begrenzt.

Für das deutsche Zwischenlagerkonzept wurde als Reaktion auf die politischen Entwicklungen seit 2013 in Kooperation mit dem Institut für Rechtswissenschaften der Technischen Universität Braunschweig ein Sammelband zur nach heutigem Stand wahrscheinlich erforderlichen Verlängerung des Zwischenlagerungszeitraums projektiert, in dem weitere Aspekte der Wartung und Instandhaltung insbesondere an den Transport- und Lagerbehältern auch vor dem Hintergrund des Strahlenschutzes behandelt werden (Köhler, 2017; Neumann, 2017).

Ergänzende Aspekte aus Fachgesprächen mit Betreibern von Zwischenlageranlagen

Als wichtiger Teilaspekt wurden Erfahrungswerte der Anlagenbetreiber zur Identifizierung von Stärken und Schwächen bestimmter Anlagentypen in die Analyse mit einbezogen. Ergänzend dazu fanden Fachgespräche mit Aufsichts- und Genehmigungsbehörden ((ehemals) Bundesamt für Strahlenschutz (BfS, D) und Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI, CH)) statt.

Auf Basis der Literaturrecherche wurden die folgenden Anlagen ausgewählt und besichtigt:

- Hoogradioactief Afval Behandelings- en Opslag Gebouw (HABOG, NL),
- Standortzwischenlager Krümmel (D),
- Transportbehälterlager Gorleben (TBL, D),
- Zwischenlager Würenlingen (ZWILAG, CH),
- Zwischenlager des Kernkraftwerks Beznau (ZWIBEZ, CH).

Bezüglich der eingelagerten hoch radioaktiven, Wärme entwickelnden Reststoffe lässt sich die Anlage HABOG in die Kategorie der Vault-Konzepte, die weiteren genannten Zwischenlager in die Kategorie der von baulichen Strukturen umgebenen Transport- und Lagerbehälter einordnen. Unter Einbeziehung vorbereiteter Fragenkataloge wurden im Zuge der Anlagenbesichtigungen jeweils Fachgespräche mit dem Betreiber geführt, in denen Betriebsabläufe, Bautechnik, Öffentlichkeitsarbeit, Alterungsmanagement und Aspekte des Strahlenschutzes diskutiert wurden. Neben den diskutierten anlagenspezifischen Fragestellungen konnten aus den Fachgesprächen auch übergreifende allgemeine Hinweise für die

Anlagengestaltung identifiziert werden, die für Langfristzwischenlager von Bedeutung sein können. Hierbei konnten insbesondere in der auf mindestens 100 Jahre ausgelegten Anlage HABOG interessante Aspekte extrahiert werden.

Insgesamt bestätigte sich, dass ein wesentlicher Aspekt der Langfristzwischenlagerung die nachlassende Wärmeentwicklung des eingelagerten Inventars ist. Auch bei heutigen, nicht als Langfristzwischenlager ausgelegten Anlagen werden besonders bei Teilbelegung, wie im Standortzwischenlager Krümmel oder im TBL Gorleben, im Winter nur noch niedrige Temperaturen innerhalb des Bauwerks erreicht, sodass Tauwasseranfall an Behälter- und / oder Bauteiloberflächen möglich ist.

Der Betrieb von Zwischenlagern kann, von Ein- und Auslagerungsvorgängen einmal abgesehen, mit verhältnismäßig wenig Personal aufrechterhalten werden. Während der Lagerungsperiode wird der Personaleinsatz im Kontrollbereich planmäßig bei Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen notwendig und lässt sich vor allem über lange Betriebszeiträume nicht vermeiden. Für die Anlagenauslegung ist demnach der zu erwartende Überwachungs- und Instandhaltungsaufwand auch vor dem Hintergrund des Strahlenschutzes für die Beschäftigten zu minimieren. So wird beispielsweise im HABOG stets ein Reservemodul freigehalten, um jedes beliebige weitere Lagermodul zur Inspektion, Wartung und Instandhaltung räumen zu können. Das jeweilige Reservemodul für die Wärme entwickelnden Abfälle (rot) und die vernachlässigbar Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle (blau) ist in der Abbildung 5.108 auf der rechten Seite zu erkennen. Zwar werden die hoch radioaktiven Abfälle hier im Gegensatz zu den Behälterkonzepten nicht nennenswert durch die Behälterwand, sondern erst durch die Stahlbetonkonstruktion abgeschirmt. Bezogen auf das in Deutschland verwendete Behälterlagerkonzept könnte ein modularer Aufbau des Lagerbereichs mitsamt Reservemodul für die Instandhaltung von Langfristzwischenlagern aber eine technische Variante zur Minimierung der Strahlenexposition der Beschäftigten sein.

Wie in anderen Bereichen gilt auch in der Kerntechnik das für die langfristige Zwischenlagerung anwendbare sogenannte KISS-Prinzip (mehrere Bedeutungen möglich, hier als „Keep It Stupidly Simple“ zu verstehen). Es kann für den Bereich der Zwischenlagerung so interpretiert werden, dass technische Lösungen möglichst leicht zu verstehen sein müssen, einfach funktionieren sollen sowie zugehörige technische Komponenten leicht ausgetauscht werden können (siehe auch Abschn. b.3.3). Ein technisches Detail aus der Anlage HABOG verdeutlicht das Prinzip (siehe Abbildung 5.109): Der Antrieb für das rote Tor besteht aus einem

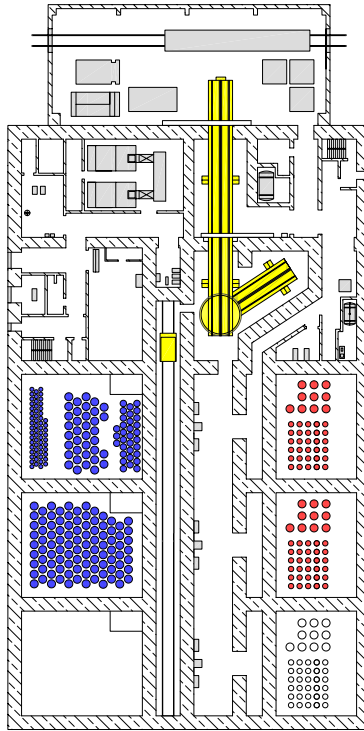


Abbildung 5.108: Grundriss der Anlage HABOG, NL, in Anlehnung an www.iaea.org.

Motor (grün), der seine Kraft über ein einfaches Zahnrad auf eine am Tor befestigte Zahnstange überträgt. Das Prinzip ist sehr einfach und auf den ersten Blick verständlich, die Komponenten lassen sich darüber hinaus gut in einem Ersatzteillager vorhalten oder erforderlichenfalls neu herstellen. Letzteres ist für Langfristzwischenlager vor allem vor dem Hintergrund des stetigen technischen Wandels von großer Bedeutung.

Möglichst unkompliziert und einfach sollten neben der Funktionalität der technischen Komponenten auch die Betriebsabläufe und Handhabungsvorgänge gestaltet werden. Dies gilt auch für eine unmissverständliche Kommunikation. Ein Beispiel hierfür ist die Farbgebung der im HABOG-Bauwerk befindlichen Bodenflächen und Tore. Im Gegensatz zu grünen Bereichen dürfen mit roten Toren verschlossene und mit rotem

Bodenbelag ausgestattete Bereiche bei Anwesenheit eines Abfallgebindes nicht betreten werden.



Abbildung 5.109: Antrieb für ein schweres Tor in der Anlage HABOG, Foto: Reichardt

5.7.4 AP 7.3 „Anforderungen aufgrund von Abfallbehandlungsmethoden“

Kurzbeschreibung der AP-Ziele. Die obertägige Lagerung bietet prinzipiell den jederzeitigen Zugang zu eingelagerten Stoffen und somit die Voraussetzung, Abfälle zu bestimmten Zwecken behandeln zu können. Es sollte untersucht werden, welche zusätzlichen Anforderungen durch zukünftige Behandlungsmethoden an obertägige Lagerungskonzepte gestellt und wie diese im technischen, betrieblichen und sicherheitsrelevanten System umgesetzt werden können. Ausgangspunkt für diese Fragen sollen die heutigen verfahrenstechnischen Möglichkeiten sein, wie sie z.B. für Partitionierung (also chemische Abtrennung hoch radioaktiver Elemente) und Transmutation (Neutronenbestrahlung) im In- und Ausland untersucht werden. Weitere Zukunftsüberlegungen und deren Folgen für die Anlagen, wie zum Beispiel Veränderung der Abfallarten, sollen einbezogen werden.

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse. In Anknüpfung an die Rechercharbeiten für das AP 7.1, die auch Brennstoff- und Abfallarten enthalten und durch die ein tieferes Verständnis von Herkunft, Eigenschaften

und möglichen Abfallklassen (nach IAEA (2009a)) aber auch im internationalen Vergleich) hergestellt wurde, wurden wichtige und weitreichende Randbedingungen für mögliche Abfallbehandlungsmethoden sowie an weitere Entsorgungsschritte angepasste Verpackungstechniken und -arten (resp. Behälter für die Zwischenlagerung) identifiziert.

Dabei entwickelte sich im AP der im Antrag benannte Aufgabenpunkt „Partitionierung und Transmutation“, im Schwerpunkt mehr zu den konventionellen Verfahren zur Konditionierung und zum Umverpacken von radioaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen. Aufgrund der politischen Entwicklungen in der Bundesrepublik Deutschland während der Projektphase und der weiterhin geringen Akzeptabilität von Partitionierungs- und Transmutationsverfahren, die nach heutigem Stand der Technik große kerntechnische Anlagen zur Umsetzung der Prozesse benötigen würden, erschien es angeraten, den Ausgangspunkt der Betrachtungen zu verändern. Der Schwerpunkt lag zwar analog zu den übrigen Arbeiten auf der Behandlung bzw. Konditionierung hoch radioaktiver, Wärme entwickelnder Abfälle, allerdings wurden auch mögliche Abfallbehandlungsmethoden für schwach und mittel radioaktive Abfälle in die Betrachtungen mit einbezogen, weil auch die Konditionierung von hoch radioaktiven Reststoffen häufig mit der Produktion von solchen radioaktiven (Sekundär-)Abfällen verbunden ist und sich daraus Anforderungen für das Gesamtkonzept von Anlagen zur Zwischenlagerung ergeben.

Ergänzend zur Literaturarbeit wurden betriebsbereite Abfallbehandlungsanlagen besichtigt und Fachgespräche mit den Betreibern dieser Anlagen geführt (ZWILAG (CH), die niederländischen Anlagen der COVRA und die PKA in Gorleben).

Für Heiße Zellen wurden die in Deutschland gültigen bautechnisch normativen Anforderungen und Konstruktionsprinzipien im Rahmen einer Bachelorarbeit systematisch zusammengestellt. In diesem Kontext wurden damit verbundene, zentrale betontechnologische Fragestellungen bearbeitet. Im Rahmen einer am iBMB betreuten Studienarbeit wurden darüber hinaus Arbeiten zu den Auswirkungen ionisierender Strahlung auf die mechanischen Eigenschaften von Beton ausgewertet. Als wichtiger Teilaspekt für die Ausführung von Konditionierungsanlagen und Heißen Zellen wurde in Kooperation mit dem KIT-INE das Abschirmungsverhalten von Normalbeton, Strahlenschutzbeton (Gesteinskörnung aus Hämatit oder Baryt) und Ultrahochfestem Beton gegenüber Gammastrahlung untersucht und verglichen (siehe Abschnitt 3.3.2).

Konditionierungsanlagen bilden das Bindeglied zwischen einzelnen Schritten in einer Entsorgungskette, weil sie für u. a. in Heißen Zellen durchgeführte Abfallbehandlungsmaßnahmen zur Überführung von ra-

radioaktiven Abfällen in einen chemisch stabilen, in Wasser nicht oder nur schwer löslichen Zustand vorgesehen sind. Nach der Verpackung der konditionierten Abfälle können die Abfallgebinde dem nächsten Schritt zugeführt werden (Zwischenlagerung, Transport, Endlagerung) (GRS, 2017).

Ziele, Durchführung und Produkte von Konditionierungsmaßnahmen sowie die Verpackung der Reststoffe hängen im Wesentlichen von den Randbedingungen der gesamten Entsorgungsstrategie ab. Aus der Wiederaufarbeitung stammende, verglaste, hoch radioaktive Abfälle wurden bereits vor der Zwischenlagerung konditioniert und sind in metallischen Kokillen eingeschlossen. In Deutschland sind die Kokillen in Transport- und Lagerbehältern verpackt (z.B. CASTOR®). Eine weitere Konditionierung dieser Abfälle ist nach dem heutigen Stand nicht zu erwarten, aber ein Umverpacken in zukünftige ggf. für die längerfristige Zwischenlagerung optimierte Behälter oder speziell für das wirtsgesteinsspezifische Endlagerkonzept entwickelte Behältersysteme muss in die Überlegungen einbezogen werden.

Für die bestrahlten Brennelemente ist aus heutiger Sicht ungewiss, ob diese in ihrer jetzigen Form verbleiben oder auf dem weiteren Entsorgungspfad noch konditioniert, vereinfacht gesagt, endlagergerecht verpackt werden. Für eine solche Konditionierung sind unterschiedlich aufwändige Varianten denkbar, zum Beispiel die Zerlegung und anschließende Kapselung der Brennelemente. Eine Entscheidung für oder wider Konditionierung hat unmittelbare Auswirkungen auf den weiteren Entsorgungspfad (Form und Größe der Behälter, Wärmeentwicklung, Strahlenschutz etc.). Die Konditionierung noch nicht behandelter, bestrahlter Brennelemente würde eine aufwändige Anlagentechnik erfordern, wie das Beispiel der Pilot-Konditionierungsanlage in Gorleben zeigt. Die Anlage ist zwar nicht für die endlagergerechte Konditionierung und Verpackung bestrahlter Brennelemente in industriellem Maßstab ausgelegt und genehmigt (max. Durchsatz von 35 t Schwermetall pro Jahr) (NMU, 2017); im Pilotbetrieb kann aber u. a. die Zerlegung von Brennelementen erprobt und weiterentwickelt werden. Für eine Konditionierung der großen Mengen unbehandelter Brennelemente wäre eine vergleichsweise große kerntechnische Anlage im industriellen Maßstab nötig, deren Genehmigung, Realisierung und Betrieb neben den technischen Herausforderungen vor allem auch erhebliches gesellschaftliches Konfliktpotential mit sich bringen würde. Demgegenüber muss abgewogen werden, ob eine Konditionierungsanlage, z. B. wegen der Ungewissheit über den Zustand der Brennelement-Hüllrohre über lange Zeiträume, vorteilhaft für die Zwischen- und / oder Endlagerung sein könnte. Die Frage nach

Abfallbehandlungsmethoden ist also von zentraler Bedeutung auch für die Zwischenlagerung.

Für die langfristige Zwischenlagerung ist es wichtig, interdisziplinäre Überlegungen zur benötigten technischen Redundanz der Anlagen, z. B. bei schadhafte Behältern oder Hüllrohren anzustellen. Technische Konzepte könnten in diesem Fall bspw. eine vorherige Kapselung der Brennelemente, eine Heiße Zelle oder ggf. eine vollständig ausgerüstete Konditionierungsanlage sein. Ein für die längerfristige Zwischenlagerung mit einer Konditionierungseinrichtung ausgestattetes Zwischenlager wäre demnach kein solitäres Gebäude, sondern eine kerntechnische Anlage mit umfangreichen technischen Einrichtungen. Die detaillierte Ausgestaltung der Anlagen zur Abfallbehandlung richtet sich nach der verfolgten Strategie (Heiße Zelle bzw. Konditionierung „zur Sicherheit“ oder mit geplanter Aufgabenstellung (Umverpacken, Kapselung, endlageregerechte Konditionierung). Bei der Behandlung bzw. Konditionierung hoch radioaktiver Abfälle entstehende Sekundärabfälle müssen darüber hinaus ebenfalls konditioniert und verpackt werden, sodass eine Anlage auch über Zwischenlagerungskapazitäten für solche zumeist schwach und mittel radioaktiven Abfälle verfügen muss.

Ein wichtiger bautechnischer Teilaspekt für die Auslegung von Heißen Zellen ist, dass hohe Strahlendosen, wie sie bspw. für deren Umschließungsbauteile bei der industriellen Konditionierung bestrahlter Brennelemente auftreten würden, zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften von Beton führen (u. a. Verlust an Festigkeit). Eine Berücksichtigung größerer Sicherheitsmargen bei der Bemessung direkt von ionisierender Strahlung betroffener Bereiche ist daher unter Berücksichtigung des Betriebskonzepts (Durchsatz, Abstand, Dosis etc.) zu prüfen. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Abschirmwirkung des Betons. Die Untersuchungen in Kooperation mit dem KIT zeigten diesbezüglich relevante Unterschiede zwischen den untersuchten Betonarten. Aus den zugehörigen Versuchs- und Berechnungsdaten lassen sich Betone hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften und Strahlenschutzwirkung optimieren und ggf. auch Rückschlüsse für Betriebsabläufe ableiten.

Zusammenfassende Darstellung der möglichen Erweiterungen für einen Anforderungskatalog zur langfristigen Zwischenlagerung

Tabelle 5.16 zeigt in stark komprimierter Form die im VP7 entwickelten, erweiterten Anforderungen und mögliche technische Realisierungsvarianten, um eine sichere Zwischenlagerung über planmäßig lange Zeiträume zu gewährleisten. Die erweiterten Anforderungen dienen dabei als An-

satzpunkte zur Konzipierung neuer Anlagen, können aber in Teilen auch auf bestehende Lagerkonzepte übertragen werden.

Tabelle 5.16: Anforderungskatalog und technische Realisierungsvarianten (Auszug).

Schutzziel / Anforderung	Erweiterte Anforderungen für Langfristzwischenlager	Technische Realisierungsvarianten
Gewährleistung der Wärmeabfuhr	Auf das Lagerkonzept und die zeitliche Veränderung der Wärmestromdichte des Inventars abgestimmtes Klimatisierungskonzept	<ul style="list-style-type: none"> • Segmentäres Lagerkonzept mit unterschiedlichen aktiv oder passiv klimatisierten Zonen • Aktives Monitoring der Temperatur, relativen Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit an maßgebenden Punkten zur Überwachung • Aufzeichnung der Messdaten, rechnerischer Abgleich der prognostizierten Zustände • Bei aktiver Wärmeabfuhr redundant funktionsfähige passive Lüftungsöffnungen • „Auskühlung“ des Lagerbauwerks verhindern (Tauwasserausfall und ggf. Frost vermeiden)
An die vorgesehene Nutzungsdauer angepasste Dauerhaftigkeit der Baustrukturen	Auslegung der Dauerhaftigkeit des Betons auf 100-jährige Nutzungsdauer	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz höherfester Betone • Kalkreiche Gesteinskörnung verwenden (resistent gegen Alkali-Kieselsäure-Reaktion) • Hochwertige Zemente verwenden (niedrige Hydratationswärmeentwicklung, hoher Sulfatwiderstand, geringer wirksamer Alkaligehalt) • w/z-Wert < 0,45 • Temperatur des Betons < 65°C • Rissbildung vermeiden/begrenzen, auch durch fachgerechte und sorgfältige Nachbehandlung bei der Errichtung

5 Ergebnisse der Teilprojekte

	Auslegung der Dauerhaftigkeit des Betonstahls auf 100-jährige Nutzungsdauer	<ul style="list-style-type: none"> • Rissbildung vermeiden/begrenzen • Betondeckung ggb. konventionellen Bauwerken erhöhen (Verwendung von Ingenieurmodellen) • Oberflächenschutzsysteme aufbringen (Achtung: Rissüberbrückung! Regelmäßiger Erneuerungsaufwand) • Einsatz korrosionsgeschützten Betonstahls („Puffer“ zwischen Einleitungs- und Korrosionsphase) prüfen • Relative Luftfeuchte mittels Klimatisierung regeln, Tauwasserausfall vermeiden
Betriebs- und instandhaltungsge- rechte Auslegung und Ausführung der Einrichtungen	Auslegung des Lagerkonzepts unter Berücksich- tigung möglicher Überwachungs- und Instandhal- tungsmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> • Mobile Abschirmungsmöglichkeiten vorhalten • Pufferzone zur kurzzeitigen Umlage- rung des Inventars in Betracht ziehen (vorübergehende „Leerung“ des betrof- fenen Bereichs) • Stärkere Abschirmungswirkung des Zwischenlagerbauwerks prüfen • Umsetzung des KISS-Prinzips („Keep It Stupidly Simple“) bezüglich tech- nischer Einrichtungen (einfache Austauschbarkeit von Kompo- nenten je nach erwartbar zuverlässiger Nutzungsdauer)
Sichere Handha- bung und sicherer Transport der radioaktiven Stoffe	An Entsorgungs- strategie ausgerich- tete Einrichtungen schaffen, z. B. für Reparaturen, zum Umpacken, Kondi- tionieren etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Heiße Zelle am Standort vorsehen • Heiße Zelle ggf. als Konditionierungs- anlage ausbilden
Professionelles Alterungsmanage- ment		<ul style="list-style-type: none"> • Rückstellproben der bei der Errichtung verwendeten Baustoffe erstellen, regel- mäßige Prüfungen • Modularen Aufbau des Lagerbereichs prüfen, ggf. Umlagerungsmöglichkei- ten für Inventar schaffen

Literatur

- [Ahrens u. a. 2013] Ahrens, Mark A.; Strauss, Alfred; Bergmeister, Konrad; Mark, Peter; Stangenberg, Friedhelm: Lebensdauerorientierter Entwurf, Konstruktion, Nachrechnung: Grundlagen und numerische Simulation. Ingenieurwissenschaftliche und baupraktische Methoden. In: *Beton-Kalender 2013: Lebensdauer und Instandsetzung - Brandschutz*. Berlin: Ernst & Sohn, 2013, S. 19–222
- [ANDRA 2012] Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs: Bilan des études et recherches sur l'entreposage : Déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue. 2012 – Forschungsbericht
- [ANDRA 2015] Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs: Recommandations pour la conception d'installations d'entreposage s'inscrivant dans la complémentarité avec le stockage : Document Remis au Ministère de l'écologie, du Développement Durable et de l'énergie dans le Cadre du Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs 2013-2015. 2015 – Forschungsbericht
- [Arndt u. a. 2003] Arndt, Björn; Klaus, Reinhold; Wasinger, Klaus: Advanced spent fuel storage pools. In: *Proceedings. Storage of Spent Fuel from Power Reactors. 2003 Conference*. Wien: International Atomic Energy Agency, 2003 (IAEA-CSP-20), S. 130–141
- [Bogdashkin 2015] Bogdashkin, E.: *Behältersysteme für radioaktive Reststoffe: Anforderungen, Konzepte und Materialkennwerte*, TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Bachelorarbeit, 2015
- [Bruder 2007] Bruder, Stephan: *Adaptive Modellierung der Dauerhaftigkeit im Zuge der Überwachung von Betonbauwerken*, TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Dissertation, 2007
- [Budelmann u. a. 2017] Budelmann, Harald; Di Nucci, Maria R.; Isidoro Losada, Ana M.; Köhnke, Dennis; Reichardt, Manuel: Auf dem Weg in die Endlagerung. Die Notwendigkeit der langfristigen Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2017), Nr. 2, S. 110–113

- [Bunn u. a. 2001] Bunn, Matthew; Holdren, John P.; Macfarlane, Allison; Pickett, Susan E.; Suzuki, Atsuyuki; Suzuki, Tatsujiro; Weeks, Jennifer: *Interim Storage of Spent Nuclear Fuel: A Safe, Flexible, and Cost-Effective Near-Term Approach to Spent Fuel Management*. Harvard University, University of Tokyo, 2001
- [DBV 2014] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hrsg.): Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen. Berlin, Januar 2014 – DBV-Merkblatt
- [DatF 2013] Deutsches Atomforum e. V.: *Internationale Organisationen auf dem Gebiet der Kernenergie*. <http://www.kernenergie.de/kernenergie-wAssets/docs/service/046internationale-organisationen2013.pdf>. Abruf: 16.03.2018
- [Drouet 2011] Drouet, Emeline: *Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires – prise en compte des transferts hydriques*, L'école normale supérieure de Cachan, Dissertation, 2011
- [ENSI 2015] Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat: Auslegung und Betrieb von Lagern für radioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente. Brugg, 30. Juni 2015 (ENSI-G04/d, Revision 2) – Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen
- [EPRI 2010] Electric Power Research Institute: Industry Spent Fuel Storage Handbook. Palo Alto, USA, 2010 – Final Report
- [Ellinger u. a. 2010] Ellinger, Alexander; Geupel, Sandra; Gewehr, K.; Gmal, Bernhard; Hannstein, Volker; Hummelsheim, Klemens; Kilger, Robert; Wagner, Markus; Schmidt, Gerhard; Spieth-Achtnich, Angelika: Sicherheitstechnische Aspekte der langfristigen Zwischenlagerung von bestrahlten Brennelementen und verglastem HAW / Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Köln, April 2010 (GRS-A3597) – Forschungsbericht
- [ESK 2013] Entsorgungskommission: Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern / RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz. 2013 – Empfehlung – Revidierte Fassung vom 10.06.2013
- [ESK 2014] Entsorgungskommission: Leitlinien zur Durchführung von periodischen Sicherheitsüberprüfungen und zum technischen Altersmanagement für Zwischenlager für bestrahlte Brennelemente und Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle. 2014 – Empfehlung

- [Feiveson u. a. 2011] Feiveson, Harold; Mian, Zi; Ramana, M. V.; von Hippel, Frank: Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors. Experience and Lessons from Around the World. In: *International Panel on Fissile Materials*, 2011
- [fib 2015] Fédération internationale du béton: Model Code for Service Life Design. Lausanne, 2015 (34) – fib bulletin
- [GRS 2017] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit: *Konditionierung radioaktiver Abfälle*. <http://www.grs.de/begriff-der-woche-konditionierung-radioaktiver-abfaelle>. Abruf: 03.03.2017
- [HSK 2008] Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen: Transport- und Lagerbehälter für die Zwischenlagerung. Brugg, April 2008 (HSK-G05) – Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen
- [Heckötter u. Sievers 2012] Heckötter, Christian; Sievers, Jürgen: Validierung von Analysemethoden zur Simulation von Aufprallversuchen im In- und Ausland / Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. Köln, 2012 (GRS-A-3677) – Abschlussbericht
- [Heckötter u. Sievers 2016] Heckötter, Christian; Sievers, Jürgen: Weiterentwicklung der Analysemethodik zur Berücksichtigung komplexer Lastannahmen bei hochdynamischen Einwirkungen auf Stahlbetonstrukturen / Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit. Köln, 2016 (GRS 410) – Abschlussbericht
- [Holtec 2015] Holtec International: *Holtec and Ameren Complete Major Civil Construction at Callaway Paving the Way for the Inaugural Loading Campaign of HI-STORM UMAX in Late Summer*. <https://holtecinternational.com/2015/05/04/holtec-and-ameren-complete-major-civil-construction-at-callaway-paving-the-way-for-the-inaugural-loading-campaign-of-hi-storm-umax-in-late-summer/>.
- [IAEA 2012a] International Atomic Energy Agency: *IAEA Safety Standards - The Global Reference for Protecting People and the Environment from Harmful Effects of Radiation*. <http://www-ns.iaea.org/downloads/standards/iaea-safety-standards-brochure.pdf>. Abruf: 01.03.2018

- [IAEA 1998] International Atomic Energy Agency: Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety : Concrete containment buildings. Wien, 1998 (IAEA-TECDOC-1025) – IAEA Technical Document
- [IAEA 2005] International Atomic Energy Agency: Remote technology applications in spent fuel management. Wien, 2005 (IAEA-TECDOC-1433) – IAEA Technical Document
- [IAEA 2006a] International Atomic Energy Agency: Fundamental Safety Principles. 2006 (SF-1) – IAEA Safety Fundamentals
- [IAEA 2006b] International Atomic Energy Agency: Storage of Radioactive Waste. Wien, 2006 (WS-G-6.1) – IAEA Safety Guide
- [IAEA 2007] International Atomic Energy Agency: Selection of Away-From-Reactor Facilities for Spent Fuel Storage : A Guidebook. Wien, 2007 (IAEA-TECDOC-1558) – IAEA Technical Document
- [IAEA 2009a] International Atomic Energy Agency: Classification of Radioactive Waste: General Safety Guide. Wien, 2009 (GSG-1) – IAEA Safety Standards
- [IAEA 2009b] International Atomic Energy Agency: Costing of Spent Nuclear Fuel Storage. Wien, 2009 (NF-T-3.5) – IAEA Nuclear Energy Series
- [IAEA 2012b] International Atomic Energy Agency: Storage of Spent Nuclear Fuel: Specific Safety Guide. Wien, 2012 (SSG-15) – IAEA Safety Standards
- [Kamali u. a. 2008] Kamali, Siham; Moranville, Micheline; Leclercq, Stéphanie: Material and environmental parameter effects on the leaching. In: *Cement and Concrete Research* 38 (2008), Nr. 4, S. 575–585
- [Kustermann 2005] Kustermann, Andrea: *Einflüsse auf die Bildung von Mikrorissen im Betongefüge*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2005
- [Köhler 2017] Köhler, Ansgar: Interventionstechniken für Zwischenlagerbehälter. In: (Köhnke u. a., 2017b), S. 51–70
- [Köhnke u. a. 2018] Köhnke, D.; Hartmann, F.; Reichardt, M.; H., Budelmann: Länderstudie: Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle in Frankreich. <https://www.entria.de/entria-arbeitsberichte.html>. Hannover, 2018 – ENTRIA Arbeitsbericht – In Vorbereitung.

- [Köhnke 2017] Köhnke, Dennis: Die unbestimmte Nutzungsdauer als besondere technische Herausforderung bei der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle. In: (Köhnke u. a., 2017b), S. 71–88
- [Köhnke u. a. 2017a] Köhnke, Dennis; Reichardt, Manuel; Budelmann, Harald: Wie organisieren andere Länder eine langfristige Zwischenlagerung hoch radioaktiver Reststoffe? In: *Atom Müll-Lager: Was soll wann wie wohin - und wer macht was?* Bd. 27. Rehburg-Loccum: Harfe-Verlag und Druckerei GmbH, 2017, S. 101–110
- [Köhnke u. a. 2017b] Köhnke, Dennis (Hrsg.); Reichardt, Manuel (Hrsg.); Semper, Franziska (Hrsg.): *Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle: Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen*. Wiesbaden: Springer, 2017
- [Neumann 2017] Neumann, W.: Sicherheit und Strahlenschutz bei Genehmigungsverlängerung zur Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. In: (Köhnke u. a., 2017b), S. 115–139
- [NMU 2017] Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz: *Pilot-Konditionierungsanlage Gorleben (PKA)*. <http://www.umwelt.niedersachsen.de/themen/atomaufsicht/versorgung/konditionierung/pilot-konditionierungsanlage-gorleben-pka-9001.html>. Ab-ruf: 03.03.2017
- [NDA 2017] Nuclear Decommissioning Authority: Interim Storage of Higher Activity Waste Packages – Integrated Approach. 2017 (3) – Industry Guidance
- [Orlowsky 2012] Orlowsky, Jeanette: *Zur Dauerhaftigkeit von Oberflächenschutzsystemen für die Erhaltung von Betonbauwerken*, RWTH Aachen, Habilitation, 2012
- [Reichardt 2017] Reichardt, Manuel: Herausforderungen und Randbedingungen für das Zwischenlagerbauwerk als langfristig wirksame, vollwertige mechanische Barriere. In: (Köhnke u. a., 2017b), S. 89–113
- [Rigo 2005] Rigo, Ellen M.: *Ein probabilistisches Konzept zur Beurteilung der Korrosion zementgebundener Baustoffe durch lösenden und treibenden Angriff*, TU Braunschweig, Dissertation, 2005
- [Romanato 2011] Romanato, Luiz S.: Advantages Of Dry Hardened Cask Storage Over Wet Storage For Spent Nuclear Fuel. In: *International Nuclear Atlantic Conference*. Belo Horizonte, Brasilien, 24.-28. Oktober 2011

- [RSK 2001] RSK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz: Sicherheitstechnische Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente in Behältern. 2001 – Empfehlung
- [Schmidt-Döhl 1996] Schmidt-Döhl, Frank: *Ein Modell zur Berechnung von kombinierten chemischen Reaktions- und Transportprozessen und seiner Anwendung auf die Korrosion mineralischer Baustoffe*, TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Dissertation, 1996
- [Schmidt-Döhl 2013] Schmidt-Döhl, Frank: *Materialprüfung im Bauwesen*. Stuttgart: Fraunhofer irb-Verlag, 2013
- [Semper 2017] Semper, Franziska: Kommentierung zu §§ 4 Abs. 1 bis 3, 11, 12, 14 - 19, Vorbemerkung zu §§ 13-20. Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag, 2017
- [Volkmer 2013] Volkmer, Martin: *Kernenergie Basiswissen*. Berlin: Deutsches Atomforum, 2013
- [WENRA 2005] Western European Nuclear Regulators Association: Waste and Spent Fuel Storage Safety Reference Levels. version 0. 2005 – Forschungsbericht
- [WENRA 2014] Western European Nuclear Regulators Association: Waste and Spent Fuel Storage Safety Reference Levels. version 2.2. 2014 – Forschungsbericht

6 Aus- und Weiterbildung

Die Aus- und Weiterbildung der im Vorhaben beschäftigten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gingen sowohl im Umfang als auch bezüglich der Inhalte deutlich über das für Forschungsvorhaben übliche Maß hinaus. Neben den in Zusammenhang mit der Forschungstätigkeit durchgeführten Promotionsverfahren bildeten auch Gastaufenthalte von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, Doktorandenkolloquien und die gemeinsame Betreuung von Seminar-, Studien- und Masterarbeiten in der universitären Ausbildung von Studierenden eine wichtige Rolle. Außerdem stellten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eine Reihe von Bildungsangeboten für Studierende (sowohl an den an ENTRIA beteiligten als auch an anderen Hochschulen) bereit.

6.1 Studienangebote

Neben einer klassischen universitären Aus- und Weiterbildung in Form von Vorlesungen und Seminaren sowie schriftlichen Ausarbeitungen in Form von Seminar-, Studien-, Bachelor- und Master-Arbeiten bis zu Promotionen zeichnete sich ENTRIA durch ein Angebot an disziplinübergreifenden Bildungsangeboten und -formaten aus. Es herrscht Konsens, dass Bedarf an einer solch fächerübergreifenden Ausbildung besteht und entsprechend geschulte Wissenschaftler benötigt werden. Diese Angebote richteten sich auch an Studierenden, die keinen unmittelbaren Bezug zum Forschungsvorhaben besaßen. Veranstaltungen fanden auch außerhalb der Universitäten statt, an denen die ENTRIA-Partner beheimatet sind.

Das IRS konzipierte und organisierte die Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf, technische Aspekte und gesellschaftlicher Diskurs“, die seit Projektstart 2013 in jedem Wintersemester stattfindet. Organisator und Vortragender ist Clemens Walther (IRS, TP 2 und TP 4); weitere Vorträge werden von Vortragenden des IRW (Brandt / Smeddinck, TP 4), ITAS (Hocke / Kuppler, TP 2), LPEU (Ott / Riemann, TP 3) sowie IELF (Röhlig, TP 1 und VP 4) angeboten. Im WS 16/17 und 17/18 beteiligte sich

außerdem das IW (Hassel, VP 6). Die Vorlesungen wurden aufgezeichnet und sind ENTRIA-intern abrufbar.

Vom 5. bis 16. August 2016 fand in Bad Honnef unter Leitung von Clemens Walther (IRS) und Werner Rühm (HMGU, München) die englischsprachige ENTRIA-Sommerschule „Radiation exposure and disposal options for nuclear waste“ mit knapp 60 Teilnehmern aus zwölf Ländern statt. 30 Dozenten berichteten über Erkenntnisse im Zusammenhang mit dem Umgang und der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Aus dem Kreis der ENTRIA-Mitarbeiter gab es Vorträge zu Szenarien, zu „exotischen Optionen“, zu Störungen der geologischen Zonen durch Errichtung eines Endlagers und zu Entwicklungen des EU-Rechts im Bereich Atomrecht, Strahlenschutz und nukleare Entsorgung.

Im Rahmen der Weiterbildung von Studierenden und Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftlern wurde am FFU für das Wintersemester 2014/15 das Konzept für eine Lehrveranstaltung entwickelt: „Nuclear Waste Disposal from a Multi-Level Governance Perspective“ und als Hauptseminar mit 30 Studierenden umgesetzt. Insgesamt wurden zehn einschlägige Hausarbeiten verfasst.

ITAS entwickelte und testete ein Aus- und Weiterbildungsmodul „Technikfolgenabschätzung und Governance“ (2013-2015). Auf dieser Grundlage fand eine einwöchige ITAS-ENTRIA-Summerschool im Juni 2015 am KIT Karlsruhe mit ENTRIA-Doktorandinnen und -Doktoranden und wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus Braunschweig und Hannover im Rahmen der Mitarbeiterweiterbildung statt. Die Konzeption wurde federführend von P. Hocke und S. Kuppler entwickelt und zusammen mit dem ITAS-Team umgesetzt (alle TP 2).

Das interdisziplinäre Seminar „Umgang mit radioaktiven Reststoffen“ wurde jeweils im Sommersemester an der TU Braunschweig vom Institut für Grundbau und Bodenmechanik (IGB), vom Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) und dem Institut für Rechtswissenschaften (IRW) gemeinsam durchgeführt. In dem Rahmen sind ca. 20 einschlägige Seminararbeiten entstanden. Es konnten je eine Seminar-Arbeit, eine Studien-Arbeit und eine Master-Arbeit in Buchform publiziert werden. Außerdem wird am IGB jedes Wintersemester das Modul „Tiefenlagerung“ angeboten, welches auch für Externe als Weiterbildungsmaßnahme offen steht.

Diese rege Teilhabe an der studentischen Ausbildung führt auch zur Anwerbung von wissenschaftlichem Personal. So wurde in einer Kooperation vom iBMB und dem IGB eine Studienarbeit zur Gegenüberstellung von Langzeitoberflächen- und Tiefenlagerung betreut, deren Bearbeiterin ab März 2017 beim IGB am ENTRIA-Projekt mitgewirkt hat. Ebenso führte

die studentische Mitarbeit am Bürgerforum zu einer Promotionsstelle im AP Umweltethik, die sich wissenschaftstheoretisch mit den Ergebnissen von Bürgerforum und Delphi-Studie auseinandersetzt und die gewonnenen Erkenntnisse vertiefen und theoretisch aufarbeiten wird.

Das AP Recht hat mehrere interdisziplinär besetzte Vortragsveranstaltungen initiiert bzw. sich an diesen beteiligt. Insbesondere Studierende, aber auch die Öffentlichkeit wurden durch diese Veranstaltungen angesprochen (Braunschweig, Halberstadt, Halle, Bad Honnef, Kassel, Lutherstadt Wittenberg).

Für Studierende des Masterstudiengangs Umweltrecht an der Universität Kassel erstellten mehrere ENTRIA-Bearbeiterinnen und -Bearbeiter ein eintägiges Studienangebot zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe. S. Chaudry, S. Kuppler, M. Reichardt, M. Riemann und U. Smeddinck referierten am 9. Juni 2015 über das Standortauswahlgesetz, Governance bei der Schweizer Endlagersuche, Ethische Fragen des Standortauswahlprozesses, Tiefenlagerung und Oberflächenlagerung.

6.2 Interne Aus- und Weiterbildung

Den am Forschungsverbund ENTRIA beteiligten Arbeitsteams wurde sehr schnell bewusst, dass neben der klassischen Ergebnisproduktion eine Vernetzung der Teams und ein Austausch über Forschungsergebnisse sehr wichtig waren und dafür auch Aus- und Weiterbildungsaktivitäten innerhalb der Aktivitäten von ENTRIA besondere Bedeutung besitzen. Die Aus- und Weiterbildungsaktivitäten fanden auf mehreren Ebenen statt und setzten in großem Umfang dialogische Formate ein. Ausgangspunkt war die gegenseitige Information und Weiterbildung zu den in den Teams erarbeiteten Ergebnissen, daraus entstanden neue Fragestellungen für vertiefte Kooperationen. Diese Kooperationen waren nicht nur disziplinär, sondern auch interdisziplinär ausgerichtet.

Eine starke Säule in der projektinternen Aus- und Weiterbildung waren die Bearbertertreffen (siehe auch Vernetzung), bei denen Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler sowohl disziplinäres Wissen präsentierten als auch in interdisziplinäre Arbeitsmethoden einführten. Diese Treffen wurden selbstorganisiert gestaltet und behandeln übergeordnete Themen der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Die daraus hervorgehende thematische Vernetzung hat zu interdisziplinären Resultaten geführt (die in den Sammelbänden und Werkstattgesprächen dokumentiert sind), die in der Projektantragsphase nicht abzusehen waren.

2013 bis 2015 organisierte das FFU jeweils halbjährlich ein Kolloquium der geistes- und sozialwissenschaftlichen Doktorandinnen und Doktoranden des ENTRIA-Verbunds. Das Kolloquium war interdisziplinär ausgerichtet und deckte die Sozial- und Geisteswissenschaften sowie die Rechtswissenschaften ab. Es nahmen rund 20 Studierende, Doktorandinnen und Doktoranden und Postdocs aktiv teil. Dies ist bis heute in der Bundesrepublik das einzige Kolloquium dieser Art. Es beschäftigte sich vertieft mit den Fragen des Rückbaus kerntechnischer Anlagen und der Entsorgung radioaktiver Reststoffe aus nicht-technischer Perspektive.

Komplementär dazu organisierten die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der naturwissenschaftlichen Fächer ein Kolloquium in Braunschweig, in dem sie sich gegenseitig Einblicke in ihre Promotionsvorhaben lieferten.

Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler des ENTRIA-Projekts konnten sich mit ihren Forschungsthemen sowohl innerhalb des universitären Umfeldes als auch in öffentlichen Veranstaltungen präsentieren. Dabei wurden Kompetenzen bei der Präsentation disziplinärer Sachverhalte in einem interdisziplinären Kontext und gegenüber unterschiedlichsten Zuhörerschaften erworben. Disziplinär erarbeitete Argumente mussten im Diskurs vertreten und das Vertreten inhaltlicher Positionen in größeren Zusammenhängen eingeübt werden. So wurden die Teilnehmerinnen und Teilnehmer des ENTRIA-Bürgerforums von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus den Bereichen Rechtswissenschaft, Geologie, Politikwissenschaft, Bauingenieurwesen und Technikfolgenabschätzung in fachlichen Vorträgen und Diskussionen mit unterschiedlichen Aspekten der Entsorgung radioaktiver Reststoffe vertraut gemacht. Fachübergreifende Lehrveranstaltungen der Universitäten Kassel und Cottbus sowie eines eigenen Formats im Rahmen der Ferienakademie „Energiewende konkret“ des Cusanuswerks wurden durch ENTRIA-Bearbeiter mit unterschiedlichen disziplinären Schwerpunkten gemeinsam gestaltet.

6.3 Promotionsvorhaben

Insbesondere auf disziplinärer Ebene wurden im Rahmen des ENTRIA-Verbundes eine Vielzahl von Qualifikationsarbeiten angefertigt. Informationen zu den im Vorhaben durchgeführten Promotionsprojekten finden sich in den entsprechenden Berichtsteilen, insbesondere in Abschnitt 8.

7 Forschungs- und Entwicklungsbedarf, Ausblick

7.1 Ausgangspunkte: Standortauswahlgesetz, Empfehlungen der Endlagerkommission und Erfahrungen des Verbundvorhabens ENTRIA

Nachfolgend wird Forschungs- und Entwicklungsbedarf für die deutsche Entsorgungsforschung benannt. Dies geschieht aus mehreren Perspektiven: Zum einen hat sich mit dem Standortauswahlgesetz und dem damit eingeleiteten Prozess eine neue Situation ergeben, die auch zu neuen Forschungsfragen führt. Des Weiteren hat die Endlagerkommission Empfehlungen für die künftige Gestaltung der deutschen Entsorgungsforschung ausgesprochen. Schließlich ergeben sich aus den im Vorhaben ENTRIA durchgeführten Arbeiten neue Forschungsfragen, aber auch Erfahrungen hinsichtlich der Arbeit eines akademisch dominierten und von den Akteuren der Entsorgungsprojekte unabhängigen Forschungsverbundes. Die Ausführungen erheben nicht den Anspruch einer umfassenden Benennung von Forschungsfragen und -gegenständen, sondern beschränken sich auf die Arbeitsgebiete des Vorhabens.

Die Endlagerkommission spricht sich für Forschung „unter der Ägide unterschiedlicher Verfahrensbeteiligter und vom Verfahren unabhängiger Institutionen“ aus. Hierzu gehört für die Kommission eine Forschung, „die auf eine von den Vorgaben des Auswahlverfahrens unabhängige Grundlagenforschung ausgerichtet ist und außerdem der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses dient“. Notwendig seien u. a. „inter- und transdisziplinäre Ansätze in der Zusammenarbeit von technischen und nichttechnischen Disziplinen mit gesellschaftlichen Akteuren“ sowie „ein ergänzender transdisziplinärer Forschungsverbund, der auf der Grundlage international anerkannter Kompetenz und eigener Forschungsleistungen unabhängig, neutral und ganzheitlich agiert, um einen konstruktiven gesellschaftlichen Beitrag zu leisten.

Im Vorhaben ENTRIA wurden weitreichende Erfahrungen hinsichtlich der interdisziplinären Zusammenarbeit von technischen und nichttechni-

schen Disziplinen gemacht (vgl. Kap. 3.1, insbesondere Abschnitt 3.1.4). Darüber hinaus erfolgten Forschungsarbeiten mit transdisziplinären Ansätzen, z. B. das Bürgerforum und die Delphi-Studie (Kapitel 3.1, 3.8, 5.3). Umfassende transdisziplinäre Entsorgungsforschung, in der Bürgerinnen und Bürger gezielt in Forschungszusammenhänge eingebunden werden, steht jedoch in Deutschland noch aus. Die Notwendigkeit für diesen Typ Forschung ergibt sich aus der Beobachtung, dass Differenzen zwischen Spezialistenwissen zur Entsorgung einerseits und den Ansichten und dem Wissen anderer Akteure andererseits offenbar nicht allein durch „bessere“ Kommunikation wissenschaftlich-technischer Sachverhalte zu überbrücken sind. Vielmehr wären, der Literatur zur Transdisziplinarität folgend, neben dem Austausch mit einschlägigen Spezialisten verschiedenste kollektive Akteure in die Analysen einzubinden, die selbst wiederum über unterschiedlichste Formen von Wissen und Expertise, aber auch Alltagswissen verfügen (Völker, 2004).

Erfahrungen bestehen auch hinsichtlich der besonderen Dynamik und Wirksamkeit akademischer Forschungsverbünde. So bewies ENTRIA Flexibilität, als sich nach der Bewilligung des Projekts entscheidende Rahmenbedingungen änderten. Die Untersuchung der drei Entsorgungsoptionen „Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit“, „Einlagerung mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit“ und „Oberflächenlagerung“ mussten in einen neuen Kontext gestellt werden, als alte Konfliktlinien am Anfang dieses Jahrzehnts aufbrachen und ein neues standortvergleichendes Standortauswahlverfahren für hoch radioaktive Abfälle und Reststoffe in Deutschland eröffnet wurde. Über die generisch angelegten Analysen der zwölf ENTRIA-Forschungspartner mit ihren Teams hinaus wurde u. a. durch die Arbeit der Endlagerkommission und das zuvor in seiner ersten Fassung verabschiedete StandAG das Nachjustieren der Fragestellung des Forschungsverbundes notwendig. Die hierfür von ENTRIA erfolgreich durchgeführten Nachjustierungen waren: Einschlägige Vorkenntnisse, interdisziplinäre Forschungserfahrung und wissenschaftliche Qualität sowie ausreichende kooperative Kompetenz ermöglichten eine thematisch-inhaltlichen Neuausrichtung, die im Verlauf des Bewilligungszeitraums sowohl unter akademischen Kriterien (Veröffentlichungen, Vorträge etc.) als auch unter Outreach-Gesichtspunkten (Anhörungen, öffentlich Veranstaltungen in Niedersachsen etc.) zu bemerkenswerten Erfolgen und erheblichem fachlichen Output führten. Dies trug zur Wahrnehmung und Anerkennung des Verbundes bei, nicht nur beim Auftraggeber, sondern auch in der Evaluierung und bei Stakeholdern. Trotz fachlicher Kompetenz gerade auch in großen Forschungsverbünden ist dies nicht immer selbstverständlich und gibt Hinweise für die Bearbeitung zukünftiger For-

schungsaufgaben gerade im aktuell laufenden neuen deutschen Standortauswahlverfahren.

Interdisziplinäre Kooperation und die manchmal stärker auf benachbarte Disziplinen ausgerichtete Interdisziplinarität war u.a. durch die Struktur der Vertikal- und Transversal-Projekte angelegt und arbeitete der Segmentierung von in sich abgekapselten Teams von Anfang an entgegen. Auch begriffliche Notwendigkeiten und Fragen der methodischen Ausrichtung wurden bereits früh adressiert und in einem gehaltvollen Prozess aufgegriffen, der zum ENTRIA-Memorandum (Röhlig u. a., 2014) führte. Durch die Unterstützung von Auftraggeber, Projektträger und Beirat wurde bei der Ausgestaltung und Nachjustierung der Einzelfragestellungen ein Raum geschaffen, der es möglich machte, innovativ und orientiert auf Forschungslücken innerhalb des gegebenen Auftrages strategisch zu forschen und dabei auch einmal eingeschlagene Pfade klassischer Problemrezeption zu verlassen. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von ENTRIA würdigten und nutzten diese Spielräume durch starkes Engagement und die Umsetzung innovativer Fragestellungen und Forschungsmethoden. Diese Richtung sollte auch bei zukünftiger Forschung unter Einhalten etablierter wissenschaftlicher Standards und in einem spezifischen Maß akademischer Freiheit weiter gefolgt werden.

Auf der Ebene der Ansprüche vieler Wissenschaftler an sich selbst und der Erwartungen der Zivilgesellschaft an Experten und Wissenschaft ist Interdisziplinarität inzwischen längst normal geworden. Für die Entsorgungsforschung hat ENTRIA diese ausstehende Entwicklung vollzogen. Diese Leistung ist nicht kleinzureden. Nicht alle, die in einem solchen Forschungsverbund zusammenkommen, sind in gleicher Weise geeignet, interessiert und motiviert. In der Summe hat ENTRIA aber einen Grad der Vernetzung und vertrauensvollen Zusammenarbeit erreicht, der die besten Voraussetzungen liefert, um sich neuen Aufgaben und Herausforderungen zu stellen. Mit der TD-Forschung hat die Wissenschaft in den letzten Jahren einen Ansatz weiterentwickelt, der gerade auch für das Feld der Entsorgung radioaktiver Reststoffe besonders geeignet erscheint, die Kluft zwischen wissenschaftlicher Expertise und gesellschaftlichen Erwartungen zu überbrücken. Inzwischen hat die Forschung generell auf die Erwartungen von innen und von außen reagiert und daher haben sich in der wissenschaftlichen Welt Konstellationen ergeben, die darüber hinausgehen nur weit voneinander entfernte Disziplinen in Forschungsvorhaben einzubinden. Interessierte Öffentlichkeit und Zivilgesellschaft werden als wichtige Ansprechpartner anerkannt und im Rahmen „transdisziplinärer Forschung“ systematisch eingebunden (vgl. Krohn u. a. (2017)). Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Forschungsthemen und die

Problemdefinition, auf welche die Forschung reagiert, nicht konfliktfrei gestellt sind. Vor diesem Hintergrund und angesichts der deutschen Erfahrungen mit der nuklearen Entsorgung, sollte transdisziplinärer Forschung gerade in diesem Themenfeld besonderes Gewicht verliehen werden. Verschiedene transdisziplinäre Elemente, die in ENTRIA punktuell eingesetzt wurden, bestätigen dies.

7.2 Governance und Technikfolgenabschätzung

Angesichts des durch das Standortauswahlgesetz eingeleiteten Prozesses bedarf die Entsorgungspolitik aufgrund der mit ihr verwobenen politischen, sozialen und soziotechnischen Herausforderungen, Entwicklungen und Dynamiken weiterhin einer politik- und sozialwissenschaftlichen Forschung. Erforderlich ist eine kontinuierliche Analyse der Mehrebenen-Governance mit besonderem Fokus auf die Rolle und Verflechtung der neuen Akteure im Verfahren (u.a. BfE, BGE, NBG) sowie der Politikinstrumente und Institutionen (z.B. Untersuchung der im Verfahren angewendeten Partizipationsformate hinsichtlich ihrer demokratischen Legitimation; Stichwort: Akzeptabilität des Verfahrens). Überdies ist eine vertiefte Untersuchung politischer Pfadabhängigkeiten zwingend, zumal alte Strukturen und Konflikte in der Entsorgungspolitik nach wie vor vorhanden sind. Daraus leitet sich auch die Begleitforschung ab, durch die die alten und neuen Dimensionen der Standortsuche identifiziert und analysiert werden können. Ferner sind Gegenwartsanalysen der Erwartungen unterschiedlicher Akteure im Verfahren (z.B. in den vom Verfahren betroffenen Regionen) ebenso durchzuführen, wie vertiefte Analysen der staatlichen Maßnahmen zur Öffentlichkeitsbeteiligung und zum Konfliktmanagement. Geboten erscheint ergänzend die eingehende Untersuchung des Stellenwerts bzw. wechselseitigen Zusammenhangs der Aspekte Freiwilligkeit und Kompensation – auch unter Einbeziehung polit-ökonomisch relevanter Fragestellungen und Konzepte, wie etwa zur Regionalentwicklung bzw. zur Infrastrukturförderung.

Aus der Perspektive der Forschung zu Governance und Technikfolgenabschätzung ergeben sich fünf Themenkomplexe, zu denen deutlicher Forschungsbedarf besteht. Zu folgenden Themen können offene Forschungsfragen formuliert werden: „Output-Legitimität“, „Schnittstellenhandeln“, „Inter- und Transdisziplinarität der Entsorgungsforschung“, „Technikfolgenabschätzung“ und „Regierungshandeln“.

Erstens, „Output-Legitimität“ zeichnet sich durch die Fragestellung aus, wie es den verfahrensführenden Behörden und Institutionen in kol-

lektiven Verfahren konzeptionell und praktisch gelingt, über soziale Innovation die Balance zwischen einerseits der Konsultation der Öffentlichkeit und andererseits deren Erwartung an Mitwirkung auszubalancieren. Zweitens gilt es, das „Schnittstellenhandeln“ zwischen formellen und informellen Prozessen im neuen deutschen Standortauswahlverfahren zu erfassen. Hierzu ist zu skizzieren, ob und wie sich die zentralen kollektiven Akteure in der ‚Post-Endlagerkommissions-Phase‘ engagieren, um proaktiv Unterstützung zu mobilisieren und ob daraus diskursiv die Aufmerksamkeit für das neue Auswahlverfahren gestärkt werden kann, um argumentbasierte Konzepte für das Gesamtvorhaben zu stärken.

Drittens sind für wissenschaftsbasiert angemessene Entscheidungsprozesse die Konzepte „Inter- und Transdisziplinarität“ zu vertiefen, um diese an die Problemlagen der nuklearen Entsorgungsforschung anzupassen; die Anpassung muss insbesondere die Besonderheiten der deutschen Standortsuche und Konzeptentwicklung berücksichtigen, die lange expertenzentriert und wenig transparent ausgestaltet war. Inter- und transdisziplinäre Forschung erfordert eine Ausarbeitung neuer Kooperations- und Koordinationsweisen, die methodisch abgesichert sind, da transdisziplinäre Forschung nicht nur das Vertrauen etablierter Akteure und Stakeholder gewinnen muss, sondern diese auch zur Mitarbeit innerhalb der Forschung gewinnen will.

Viertens ist aus Perspektive der Technikfolgenabschätzung das technische Artefakt Endlagerbergwerk mit Vorkehrungen zu Rückholbarkeit notwendig mitsamt der Gesamtinfrastruktur eines Entsorgungspfades mit all ihren verschiedenen Elementen (Zwischenlager, Eingangslager, Heiße Zelle, etc.) in seinen sozialen und umweltbezogenen Nebenfolgen zu reflektieren, um raum- und kontextbezogene Herausforderungen in den Blick nehmen zu können; insbesondere die Reflexion der erwartbaren sozialen Nebenfolgen derartiger Planungsprozesse und ihre dialogisch-deliberative Einbettung sind planungswissenschaftlich und empirisch gestützt früh zu analysieren. Zu erwartende Raumwirkungen und Konfliktlinien derartiger Infrastrukturanlagen sind mit soziotechnischen Fragestellungen zu verknüpfen.

Fünftens besitzt „Regierungshandeln“ neben dem Flankieren des Standortauswahlverfahrens eine eigene Qualität. Gerade angesichts der erheblichen Zeiträume, die für die Verwirklichung der Errichtung eines Endlagers notwendig sind, ist aus demokratietheoretischer Perspektive zu beachten, wie die Fachpolitik der nuklearen Entsorgung parlamentarisch unterstützt wird. Ob und wie Parlamente, Parlamentsausschüsse und politische Parteien das Standortauswahlverfahren aufgreifen und als gemeinwohl-orientiertes Projekt mittragen und damit der Öffentlichkeit

als plausibel erläutern, ist mit Methoden der Government-Forschung und Policy-Analyse zu bearbeiten.

7.3 Philosophische Ethik

Nach der in ENTRIA geleisteten Analyse der ethischen Herausforderungen und Konflikte bei der Entsorgung sieht die philosophische Ethik Forschungsbedarf vor allem bei der Konzeption und Verwirklichung eines Entsorgungspfades und der zugehörigen Standortauswahl.

Dabei ist erstens mit den zu erwartenden konfliktträchtigen Zeithorizonten einer Standortauswahl proaktiv umzugehen. Wie es scheint, wird jede Entsorgungsstrategie mit einer Verlängerung der obertägigen Zwischenlagerung einhergehen müssen. Insofern besteht die Notwendigkeit, sachkundige Debatten über Standorte, technische Nachrüstung und die Sicherheit (safety und security) solcher Anlagen zu führen. Aufgabe der Ethik ist es hierbei, auf die Bedeutung von Redundanzen in der Entsorgungsstrategie aufmerksam zu machen, die für mögliche Prozessverzögerungen eingeplant werden müssen, und deren Präsuppositionen anzuzeigen. Mit Blick auf eine längerfristig rückholbare Tiefenlagerung gilt es zweitens, Kriterien für eine eventuelle Rückholung, respektive für den vollständigen Verschluss herauszuarbeiten.

Drittens sind derzeit a) die Fragen von Gerechtigkeitsvorstellungen bei der Verteilung gesellschaftlicher Lasten einschließlich der Kompensation sowie b) die Frage nicht befriedigend bearbeitet, wann ein Verfahren der Entsorgung als „gerecht genug“ beurteilt und wahrgenommen werden kann. Hierzu muss sowohl eine Brücke zur Sozialpsychologie als auch zur Kommunikationstheorie geschlagen werden, um die Frage nach Verzerrungen in Gerechtigkeitsdiskursen näher zu beleuchten („wicked communication“). In der Konkretisierung von Standortauswahl und Entsorgungspfad gilt es viertens, auch die Gerechtigkeitsdimension zu spezifizieren und satisfaktorische Kriterien herauszubilden.

Betrachtet man die in ENTRIA geleisteten Arbeiten als interdisziplinäre Grundlagenforschung im Bereich der nuklearen Entsorgung, besteht Bedarf, diese fortzusetzen und gleichzeitig transdisziplinär für die nun anstehenden Schritte der Standortauswahl zu operationalisieren.

7.4 Rechtswissenschaften

Aus der Perspektive des ENTRIA-Arbeitspakets ‚Verfassungsrechtliche Grundlagen und verwaltungsrechtliche Implikationen‘ ergeben sich fünf Themenkomplexe, zu denen deutlicher Forschungsbedarf besteht:

- Unerlässlich ist eine belastbare Klärung des Regelungsgehaltes des neuen Standortauswahlgesetzes 2017 – wie es vom Parlament gestaltet wurde – auf Basis der rechtswissenschaftlichen Auslegungsregeln und unter Auswertung verfassungs- und verwaltungsrechtlichem Schrifttums.
- Normanwendung ist stets ein kontextabhängiger Prozess der Wirklichkeitskonstruktion. Der Blick ist nicht allein auf die Vorschrift, den Normtext, sondern auf den gesamten Steuerungszusammenhang einer Aufgabenerfüllung zu richten. Aufschluss gewähren hier insbesondere interdisziplinäre Erkenntnisse und Einsichten, die es ermöglichen die Problemlösungsfähigkeit des Rechts zu erhöhen.
- Das demokratische Geschehen in Deutschland ist einem starken Wandel unterworfen. Es ist zu untersuchen, inwieweit das Zusammenspiel aus formellen und informellen Formen und Formaten zur Beteiligung der Öffentlichkeit – die das StandAG verbindlich regelt bzw. anregt – genutzt werden können, um zur Verständigung beizutragen, zusätzliche Legitimation zu erzeugen, damit die Realisierung eines Endlagers zu erleichtern und zu einer besseren Wirksamkeit des Rechts beizutragen. Hier ist die Wirkung von Rechtsvorschriften und Werthaltungen in transdisziplinären Settings eine wichtige Erkenntnisquelle.
- Die Realisierung eines Endlagers ist ein in Deutschland unbeliebtes Projekt. Auffällig und rechtswissenschaftlich in Kooperation – insbesondere mit Ethik und Politikwissenschaft – zu würdigen, wäre die bemerkenswerte und immer weitergehende Vorverlagerung von Aktivitäten und Maßnahmen, die frühzeitig und mit weichen Formen der Verhaltensbeeinflussung darauf abzielen, Konflikte abzufangen und zu reduzieren.
- Die Ausführung des StandAG erfolgt unter widrigen Umständen, ja Widerständen, Es wäre näher zu untersuchen, inwieweit das Resilienz-Konzept geeignet ist, auf die Ausgestaltung von Recht übertragen werden kann, inwieweit eine resiliente Regulierung denkbar ist, die den Steuerungserfolg – die Realisierung eines Endlagers – besser erreichen kann.

7.5 Endlagerauslegung und Rückholprozesse

Vor dem Hintergrund der in ENTRIA grundsätzlich untersuchten Möglichkeiten zum Monitoring sind zur Vertiefung des Systemverständnisses und zur Frage der Akzeptanzverbesserung weiterführende Untersuchungen sowohl auf inter- / disziplinärer als auch auf transdisziplinärer Ebene erforderlich. Dabei stehen u. a. sicherheitsgerichtete Aspekte im Vordergrund, z. B. die Frage nach der zusätzlichen Barrierenschädigung durch Anordnung der Monitoringsohle und dem zusätzlichen Raumbedarf in Hinblick auf die Kriterien eines Standortauswahlverfahrens,

Ergebnisse aus den Untersuchungen im Vorhaben ENTRIA zur Einlagerung in tiefen geologischen Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit führen zu der Frage, welche gebirgsmechanischen Konsequenzen im Nahfeldbereich aus dem konkreten Rückholprozess resultieren. Im Rahmen von ENTRIA wurden die Implementierung der Rückholbarkeit bei der Auslegung eines Tiefenlagers und die Entscheidungskriterien über eine Rückholung der eingelagerten Abfälle bzw. die Umwandlung in ein Endlager behandelt. Es sollte weiterhin erarbeitet werden, welche gebirgsmechanischen Aspekte bei einer sicheren Rückholung der Behälter relevant sind, sofern die Entscheidung zur Rückholung getroffen wird. So ist beispielsweise das Risiko eines Verbruchs der überwältigten Strecken zu analysieren, da dann von einer unkontrollierbaren Ausbreitung von Radionukliden im Nahfeld ausgegangen werden muss.

Darüber hinaus ist die Auslegung des Tiefenlagers auf Basis des Rückholprozesses und der systembedingten Streuungen aufgrund des stochastischen Verhaltens des Gebirges zu überprüfen und weiter zu detaillieren. Zur Beurteilung der Standsicherheit der aufgefahrenen Hohlräume während einer Rückholung ist der Rückholprozess konkret zu planen und zu beschreiben, wie die Standsicherheit gewährleistet werden kann. Angesichts der Dauer des Rückholprozesses und einer Entscheidung für die Rückholung aus gebirgsmechanischen Gründen sollte ebenso untersucht werden, welche Auswirkungen der Rückholprozess auf die Standsicherheit der Hohlräume und die Integrität der Barrieren hat.

Vor dem Hintergrund des Standortauswahlverfahrens ist es erforderlich, bestehende Behälterkonzepte zu überprüfen bzw. neue zu entwickeln. Eine Weiterentwicklung der in ENTRIA untersuchten generischen Behälterkonzepte kann hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten. Mit einem modularen Aufbauprinzip der Endlagerbehälter kann dabei auf die Ungewissheiten im Entsorgung- und Standortauswahlprozess reagiert werden. Parallel hierzu kann eine weitere Ausdetaillierung der generi-

schen Behälterkonzepte erfolgen, um die Vielfalt der einzulagernden Reststoffe detaillierter abbilden zu können.

7.6 Monitoring und Sicherheitsnachweis

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich aus dem Vergleich der erforderlichen messtechnischen Begleitung, insbesondere während des Rückholprozesses. Ausgehend von den Ergebnissen im Rahmen von ENTRIA zum Monitoring in der Betriebsphase bis zur Entscheidung einer Rückholung oder Umwandlung in ein Endlager, stellt sich die Frage, welche Messdaten zur Beurteilung des Zustandes der aufzuwältigenden Einlagerungsstrecken erforderlich sind. Die Messdaten werden ebenso benötigt, um weitere Arbeitsschutzmaßnahmen für den Rückholprozess zu planen. Auch hier sind die systembedingten Streuungen der Messergebnisse – ggf. mittels probabilistischer Methoden – mit in die Überlegungen einzubeziehen.

Derzeit sind noch keine Lösungen für das Monitoring eingelagerter Tiefenlagerbehälter auf dem Markt verfügbar, welche ohne eine Perforation der umgebenden Barrieren auskommen. Im Idealfall sollten weitestgehend autark arbeitende, behälterintegrierte Monitoringsysteme Rückschlüsse auf den Zustand der Behälter im Tiefenlager ermöglichen. Die Herausforderung für eine anwendungsorientierte Grundlagenforschung besteht darin, durch Werkstoffforschung Materialien und Mechanismen zu identifizieren, die es ermöglichen geeignete Sensoren zu entwickeln.

Es stellen sich Fragen nach dem aus fachlicher und aus Stakeholdersicht als erforderlich erachtetem Monitoring, um einerseits die Endlagersicherheit zuverlässig zu belegen und um andererseits dem Bedürfnis der Öffentlichkeit nach Transparenz und Vertrauen zu genügen. Daraus resultieren nachstehende Forschungsfragen:

1. inter- / disziplinär:

- Verbesserung der Grundlagen für die TH2M-basierte physikalische Modellierung, z.B. laborative Ermittlung von Zweiphasenfluss-Parametern für Tongestein bzw. Bentonit oder der Querdruckentwicklung von Bentonit
- Verbesserung der Effektivität des bislang verwendeten FTK-Simulationsinstrumentariums durch Einsatz des neu implementierten parallelisierten TOUGH2-MP-Simulators (möglichst realitätsnahe Ermittlung nachweisrelevanter Zustandsgrößen in ihrer räumlich/zeitlichen Entwicklung)

- Analyse der Auswirkungen des direkten Monitorings mit zusätzlicher Überfahrungssohle auf die Endlagersicherheit (Barrierschädigung) und die Standortauswahl (Raumbedarf).

2. transdisziplinär:

- Ermittlung der Anforderungen von Stakeholdern, Öffentlichkeit im Hinblick auf Endlager-Monitoring
- Visualisierung der sicherheitstechnisch relevanten Zustandsgrößen der Endlagerentwicklung in Raum und Zeit für generische Endlagersysteme in Salinar- und Tongesteinsformationen als Grundlage für den Aufbau eines gemeinsamen Prozessverständnisses / Erörterung von Möglichkeiten und Grenzen im kritischen Diskurs
- Analyse der grundsätzlichen Rahmenbedingungen für eine Tolerierung von Standorterkundungen durch die lokale und breite Öffentlichkeit und Formulierung von Anforderungen an Akzeptabilität einer Endlagerplanung vor dem Hintergrund von Transparenz, Vertrauen, Partizipation, Fehlerkorrektur im gemeinsamen Prozess

Das zum Nachweis der Sicherheit von Endlagern entwickelte Werkzeug des Safety Case ist etabliert und hat sich bei der Unterstützung von Entscheidungs- und Genehmigungsprozessen in vielen nationalen Endlagerprogrammen bewährt. Vor dem Hintergrund des Standortauswahlgesetzes und insbesondere der darin vorgesehenen Sicherheitsuntersuchungen ergeben sich jedoch neue Herausforderungen. Dies betrifft die (Weiter-)Entwicklung von Behälter-, Sicherheits-, Endlager- und Nachweiskonzepten für die verschiedenen Wirtsgesteinstypen vor dem Hintergrund der vom Standortauswahlgesetz vorgesehenen Verordnungen zu Sicherheitsanforderungen und vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und die Frage einer angemessenen Vergleichsmethodik zur Endlagersicherheit an verschiedenen Standorten. Darüber hinaus stellt sich aber die Frage der Akzeptabilität und Akzeptanz der Sicherheitsuntersuchungen – bereits in Sondervoten zum Kommissionsbericht wurden diesbezügliche Zweifel geäußert. Transdisziplinäre Forschung zum Safety Case böte das Potential, Paradigmen und Methoden des Safety Case einem „stretching“ zu unterziehen und unterschiedliche Risikoansichten in die Diskussion einzubeziehen. Insbesondere ist dabei auch von Interesse, inwieweit Werthaltungen, die bisher implizit in den Safety Case eingeflossen sind, transparenter gemacht werden können.

Transparenz zu unterschiedlichen Werthaltungen, die den Diskurs zur Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle prägen, ist geeignet, die Verständi-

gung über sicherheitsrelevante Fragen zu fördern. Darüber hinaus gehend besteht Forschungsbedarf dazu, welche Anforderungen und Bedürfnisse an den Safety Case in der interessierten Öffentlichkeit vorhanden sind und inwieweit der Safety Case aufgrund der so gewonnenen Erkenntnisse einer transdisziplinären Erweiterung bedarf. Es sind also Möglichkeiten und Grenzen einer Erweiterung des Konzepts des Safety Case zu untersuchen und letztlich das Vertrauen in Akteure und Methoden zu verbessern (Baudé u. Hériard-Dubreuil, 2017; Röhligh u. Eckhardt, 2017).

Bei der Bearbeitung des ENTRIA-Arbeitspakets „Interdisziplinäre Risikoforschung“ zeigte sich, dass insbesondere noch Forschungsbedarf zum Konzept der Ungewissheiten sowie zum Umgang mit Ungewissheiten besteht. Ungewissheiten werden gegenwärtig auch in anderen Kontexten stark thematisiert, beispielsweise im Bereich des Klimawandels. Bei künftigen Forschungsarbeiten zu Ungewissheiten bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle lassen sich daher gut Bezüge zu anderen aktuellen Forschungsfeldern herstellen. Vertiefte Erkenntnisse zur Rolle von Ungewissheiten bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle sind auch geeignet, zur Weiterentwicklung des Safety Case beizutragen.

Ein Instrument zur ganzheitlichen Einschätzung und Bewertung von Risiken und Ungewissheiten ist die Technikfolgenabschätzung. Daher sollte geprüft werden, inwieweit methodische Ansätze aus der Technikfolgenabschätzung für Safety Cases bei der Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle nutzbar gemacht werden können.

Auch die Werkzeuge, zum Beispiel zur Langzeitsicherheitsanalyse, könnten aufgrund transdisziplinärer Forschung im Sinne einer besseren Kommunikation zu Analysemethoden und -ergebnissen angepasst und verbessert werden. Dies gilt auch für die im Vorhaben ENTRIA entwickelte Softwareplattform ReSUS zum Einsatz in Forschung und Ausbildung. Deren neuartiges Plattformkonzept würde darüber hinaus durch die Einbindung weiterer THMC-Codes und weiterer Verfahren für Stichprobengenerierung, Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse an Stärke gewinnen. Forschung zum Schwerpunkt Archivierung und Reproduzierbarkeit von Daten, Methoden und Ergebnissen der Sicherheitsanalyse würde einen Beitrag zu den von der Endlagerkommission benannten Notwendigkeiten des Wissensmanagements und der Datenerhaltung leisten.

Im Rahmen der Sicherheitsanalyse eines Endlagers müssen Transportwege von Radionukliden bis in die Biosphäre verstanden werden. Im Bereich des Fernfeldes, also im oberflächennahen Bereich (Grundwasser, Boden, Pflanze) bestehen jedoch erhebliche Defizite sowohl bei der Modellierung von Feuchteprofilen, Transport in der ungesättigten Zone als auch beim Verständnis der chemischen (Redox-)Vorgänge wichtiger Radionu-

klide und dem mikroskopischen Verständnis der Aufnahme in Pflanzen und somit dem Übergang in die Nahrungskette (Noseck u. a., 2012). Dies spiegelt sich auch in den verfügbaren Datenbasen wieder (International Atomic Energy Agency, 2010). Diese Kenntnis ist für einen Vergleich verschiedener Endlagerkonzepte erforderlich, auch wenn Dosisgrößen nur als Vergleichsparameter und nicht im Sinne einer effektiven Dosis für eine Referenzperson genutzt werden. Die im Rahmen von ENTRIA durchgeführten Strahlungstransportrechnungen sind auf dickwandige Endlagerbehälter (POLLUX®, ENCON) für die Wirtsgesteine Steinsalz, Tonstein und Kristallin beschränkt. Dies sollte auf vergleichsweise dünnwandige Endlagerbehälter, die an die schweizerischen (Diomidis u. Johnson, 2014) und schwedischen (SKB, 2010) Behälterkonzepte angelehnt sind, ausgedehnt werden. Es sollte geprüft werden, ob der Behälter, der bis jetzt nur passives Element darstellt, künftig im Monitoring Prozess eine aktive Rolle übernehmen sollte und mit Sensoren ausgestattet werden kann. Hierfür sind die prinzipiellen Erfordernisse an die Sensorentechnik, insbesondere die Abschätzung vorhandener Strahlenfelder und deren Langzeiteinfluss auf die Sensoren zu bestimmen.

Literatur

- [Baudé u. Hériard-Dubreuil 2017] Baudé, Stéphane; Hériard-Dubreuil, Gilles: Inclusive safety culture for long-term governance of geological disposal: Interacting with civil society along the development of the geological disposal safety case. In: *Joint IGSC/SITEX Seminar on Regulatory Review of Safety Cases for Geological Disposal of Radioactive Waste*. Paris, 2017
- [Diomidis u. Johnson 2014] Diomidis, Nikitas; Johnson, Lawrence H.: Materials Options and Corrosion-Related Considerations in the Design of Spent Fuel and High-Level Waste Disposal Canisters for a Deep Geological Repository in Opalinus Clay. In: *JOM* 66 (2014), Nr. 3, S. 461–470
- [International Atomic Energy Agency 2010] International Atomic Energy Agency (Hrsg.): *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments*. Wien: International Atomic Energy Agency, 2010
- [Krohn u. a. 2017] Krohn, Wolfgang; Grunwald, Armin; Ukowitz, Martina: Transdisziplinäre Forschung revisited: Erkenntnisinteresse, Forschungsgegenstände, Wissensform und Methodologie. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2017), Nr. 4, S. 341–347

- [Noseck u.a. 2012] Noseck, Ulrich; Brendler, Vinzenz; Flügge, Judith; Stockmann, Madlen; Britz, Susan; Lampe, Michael; Schikora, Johannes; Schneider, Anke: *Realistic Integration of Sorption Processes in Transport Codes for Long-Term Safety Assessments*. Köln: Ges. für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), 2012 (GRS 297)
- [Röhlig u. Eckhardt 2017] Röhlig, Klaus-Jürgen; Eckhardt, Anne: Primat der Sicherheit – Ja, aber welche Sicherheit ist gemeint? In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2017), Nr. 2, S. 103–105
- [Röhlig u.a. 2014] Röhlig, Klaus-Jürgen; Walther, Clemens; Bach, Friedrich-Wilhelm; Brunnengräber, Achim; Budelmann, Harald; Chaudry, Saleem; Eckhardt, Anne; Geckeis, Horst; Grunwald, Armin; Hassel, Thomas; Hocke, Peter; Lux, Karl-Heinz; Mengel, Kurt; Metz, Volker; Ott, Konrad; Plischke, Elmar; Riemann, Moritz; Smeddinck, Ulrich; Schreurs, Miranda A.; Stahlmann, Joachim: Memorandum zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe. https://www.entria.de/fileadmin/entria/Dokumente/ENTRIA_Memorandum_140430.pdf. Hannover, 2014 – ENTRIA Arbeitsbericht
- [SKB 2010] Svensk Kärnbränslehantering AB: Design, Production and Initial State of the Canister. Stockholm, 2010 (TR-10-14) – Technical Report
- [Völker 2004] Völker, Harald: Von der Interdisziplinarität zur Transdisziplinarität? In: *Transdisziplinarität. Bestandsaufnahme und Perspektiven*. Göttingen: Universitätsverlag, 2004, S. 9–28

8 Veröffentlichungen, Fachbeiträge, Bildungsangebote und öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen

Nachfolgend werden die im Vorhaben ENTRIA oder unter ENTRIA-Beteiligung erarbeiteten Veröffentlichungen und Vorträge sowie die öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen und Bildungsangebote für Externe aufgezählt, die im Rahmen des Vorhabens veranstaltet wurden bzw. zu denen Beiträge geleistet wurden. Bei mehr als drei Autorinnen und Autoren wird nur die bzw. der Erstgenannte, gefolgt von „et al.“ aufgeführt, die Rolle von ENTRIA-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftlern ist dann u. U. nicht unmittelbar aus der Autorenliste erkennbar.

Bücher wurden aufgeführt, sofern sie im Rahmen des Vorhabens herausgegeben wurden oder herausgegeben werden. Weiterhin werden einzelne Kapitel (etwa von Sammelbänden) angegeben, wenn sie im Vorhaben erarbeitet wurden. Im Vorhaben herausgegebene Bücher erscheinen also i. d. R. mehrfach – sowohl als Buch als auch bei den Angaben einzelner im Vorhaben erstellter Kapitel.

Wegen der in den verschiedenen Disziplinen sehr unterschiedlichen Publikationskultur wurde bei den Veröffentlichungen auf Angaben zur Exzellenz wissenschaftlicher Veröffentlichungen (z. B. impact factor von Zeitschriften) verzichtet. Um eine möglichst vollständige Darstellung zu erreichen, werden auch in Vorbereitung oder im Erscheinen befindliche Veröffentlichungen aufgeführt, dies ist jeweils entsprechend vermerkt. „Im Erscheinen“ bedeutet hierbei, dass die Veröffentlichung bereits zur Publikation angenommen wurde.

Vorträge auf wissenschaftlichen Konferenzen werden als Veröffentlichungen angegeben, falls sie in einem Konferenzband publiziert wurden oder werden, anderenfalls finden sie sich unter der Überschrift „Fachbeiträge“. Unter dieser Überschrift erfolgen außerdem Angaben zu Teilnahmen an Podiumsdiskussionen o. ä., sofern sie im Rahmen wissenschaftlicher Veranstaltungen stattfanden. Um dem interdisziplinären Charakter

Tabelle 8.1: Veröffentlichungen, Fachbeiträge und Nachwuchsförderung.

		Gesamt	Disziplinär	Interdisziplinär
Veröffentlichungen		239	163	76
davon:	Artikel	80	61	19
	Buchkapitel	82	53	29
	ENTRIA-Arbeitsbericht	15	10	5
	Konferenzbeitrag	25	18	7
	Buch	26	12	14
	Berichtsreihe	3	2	1
	Dissertation	8	7	1
Fachbeiträge		179 davon 3 Keynote, 85 eingela-	143 davon 3 Keynote, 66 eingela-	36 davon 0 Keynote, 19 eingela-
davon:	Vortrag	137	108	29
	Poster	32	28	4
	Podiumsdiskussion	2	1	1
	Kommentar	2	2	0
	Buchpräsentation	1	1	0
	Impulsvortrag	3	1	2
	Expertengespräch	1	1	0
	Exkursion	1	1	0
Nachwuchsförderung		120	105	15
davon:	Dissertation	22	20	2
	Masterarbeit	16	15	1
	Bachelorarbeit	31	29	2
	Seminararbeit	21	16	5
	Studienarbeit	27	23	4
	Projektarbeit	2	2	0
	Andere	1	0	1

des Vorhabens gerecht zu werden und um die Rolle disziplinärer wie auch interdisziplinärer Arbeit im Vorhaben zu dokumentieren, werden die interdisziplinären Veröffentlichungen und Fachbeiträge getrennt von den disziplinären aufgeführt. Diese Unterscheidung ist bis zu einem gewissen Grade eine Ermessensfrage, es wurde jedoch darauf geachtet, dass Veröffentlichungen und Fachbeiträge, die weit voneinander entfernte Disziplinen (z. B. naturwissenschaftlich-technische Disziplinen einerseits und geistes- und sozialwissenschaftlicher Disziplinen andererseits) betreffen, in jedem Fall als interdisziplinär eingeordnet wurden.

Für die öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen und Bildungsangebote für Externe ist eine solche Trennung dagegen nicht sinnvoll. Es ist davon auszugehen, dass jede Veranstaltung für externes Publikum sowohl technische als auch nicht-technische Aspekte der Entsorgungsproblema-

tik umfasst. Unter „Öffentlichkeitswirksamkeit“ wird hier sowohl eine Wirksamkeit in politische Gremien und Stakeholder-Gruppen als auch in die interessierte Öffentlichkeit verstanden. Es versteht sich, dass auch hier wissenschaftliche Inhalte kommuniziert wurden, dennoch werden diese Beiträge getrennt von den oben genannten „Fachbeiträgen“ zu wissenschaftlichen Veranstaltungen aufgeführt, um so einen Indikator für die Außenwirkung des Vorhabens bereitzustellen.

Einladungen von ENTRIA-Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern z. B. in die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe oder in politische Gremien erfolgten i. d. R. im Hinblick auf deren persönliche Expertise, nicht notwendigerweise wurden diese Personen als Repräsentanten des Vorhabens eingeladen und wahrgenommen. Es wurden auch nicht notwendigerweise in ENTRIA erarbeitete Ergebnisse vorgetragen. Da derartige Einladungen jedoch ein Indikator für die Vernetzung und die Reputation der ENTRIA-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler sind, werden sie in der Rubrik „Öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen und Bildungsangebote“ aufgeführt.

8.1 Interdisziplinäre Veröffentlichungen

2013

Smeddinck U. und Roßegger U. (2013) Partizipation bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe – unter besonderer Berücksichtigung des Standortauswahlgesetzes. *Natur+Recht* **35** (8), 548–556

2014

Hocke P. und Röhlig K.-J. (2014) Challenges of communicating safety case results to different audiences. In: Radioactive Waste Management Committee (Hrsg.) *The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art. Symposium Proceedings. 7–9 October 2013, Paris, France* (Konferenzband). Paris, 373–384

Lux K.-H., Wolters R. und Zhao J. (2014) Risikolandschaft und erste Gedanken zu einer Operationalisierung in Bezug auf den Vergleich der Entsorgungsoptionen. Interner Bericht. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik

Röhlig K.-J. et al. (2014) Memorandum zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe

Tabelle 8.2: Öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen, Bildungsangebote für Externe sowie Maßnahmen zur Aus- und Weiterbildung.

	Gesamt	Disziplinär	Interdisziplinär
Öffentlichkeitsarbeit	185		
davon:			
Vortrag	85		
Workshop	4		
Poster	6		
Podiumsdiskussion	8		
Vorlesung	49		
Veranstaltungen mit	1		
Schulklassen			
Diskussion	4		
Impulsvortrag	3		
Fachgespräch	1		
Schulung	1		
Bürgerforum	1		
Interview	5		
Tagesprogramm	1		
Pressekonferenz	1		
Kurzgutachten	1		
Rezension	3		
ENTRIA-	1		
Podiumsdiskussion			
Anhörung	5		
Schulstunde	1		
Wissenschafts-	1		
Speed-Dating			
Kurzfilm mit Statement	1		
Projektstage	2		

2015

- Appel D., Kreusch J. und Neumann W. (2015) Darstellung von Entsorgungsoptionen. ENTRIA-Arbeitsbericht 01
- Brunnengräber A. et al. (2015) Grenzwerte beim Umgang mit radioaktiven Reststoffen. Arbeitsbericht des ENTRIA-Transversalprojekts 2. Interner Bericht. Forschungszentrum für Umweltpolitik
- Diener L. (2015) ENTRIA – Werkstattgespräch „Grenzwertbildung im Strahlenschutz“. *atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie* **2015** (3), 184–185

- Driftmann C. und Josipovic N. (2015) Beratung und Wissensmanagement bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Nutzung externen Wissens und des Asse-Archivs. Berliner Wissenschafts-Verlag
- Hocke P. und Kallenbach-Herbert B. (2015) Always the Same Old Story? Nuclear Waste Governance in Germany. In: Brunnengräber A. et al. (Hrsg.) Nuclear Waste Governance. An International Comparison. Springer Fachmedien Wiesbaden, 177–201
- Ott K. et al. (2015) ENTRIA-Bewertungsgrundlagen. Zwischenstand und Diskussionsgrundlage für das Entria-Jahrestreffen 2015. Interner Bericht. Lehrstuhl für Philosophie und Ethik der Umwelt
- Röhlig K.-J. (2015) Diskussionspapier zur interdisziplinären Arbeit und Synthese im Projekt ENTRIA. Diskussionsgrundlage für das ENTRIA-Jahrestreffen 2015. Interner Bericht. Institut für Endlagerforschung
- Röhlig K.-J. et al. (2015) The ENTRIA-Project: Selected Disciplinary and Interdisciplinary Research Topics / Das ENTRIA-Projekt: Ausgewählte disziplinäre und interdisziplinäre Forschungsthemen. *Mining Report Glückauf* **151** (3), 211–222
- Röhlig K.-J. et al. (2015) The Challenge of Interdisciplinarity: First Steps Towards a Joint Working Approach – the ENTRIA Project. In: Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (Hrsg.) *Key Topics in Deep Geological Disposal: Conference Report* (Konferenzband). KIT Scientific Publishing, 59–63
- Walther C., Röhlig K.-J. und Smeddinck U. (2015) ENTRIA – oder die Chancen des Interdisziplinären. *StrahlenschutzPRAXIS* **2015** (2), 28–34

2016

- Bimesdöfer K., Oerding S. und Riemann M. (2016) Endlager benötigen eine gesellschaftliche Betriebserlaubnis. Bürgergutachten „Wohin mit unserem Atommüll?“. In: Brunnengräber A. (Hrsg.) Problemfälle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll. edition sigma, 409–430
- Bozau E. (2016) Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland – es geht uns alle an. *Grundwasser* **21** (3), 201–202
- Brunnengräber A. (Hrsg.) (2016) Problemfälle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll. edition sigma
- Brunnengräber A. (2016) Die atompolitische Wende. Paradigmenwechsel, alte und neue Narrative und Kräfteverschiebungen im Umgang mit radioaktiven Abfälle. In: Brunnengräber A. (Hrsg.) Problemfälle Endlager

- Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll. edition sigma, 13–32
- Brunnengräber A. et al. (2016) Grenzwerte beim Umgang mit radioaktiven Reststoffen. Arbeitsbericht des ENTRIA-Transversalprojekts 2 (Überarbeitete Version). Interner Bericht. Forschungszentrum für Umweltpolitik
- Brunnengräber A. und Smeddinck U. (2016) Möglichkeiten und Grenzen der Vereinheitlichung wissenschaftlicher Begriffe in der interdisziplinären Zusammenarbeit. Eine politik- und rechtswissenschaftliche Auseinandersetzung. In: Chaudry S., Kuppler S. und Smeddinck U. (Hrsg.) Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Springer Fachmedien Wiesbaden, 67–76
- Chaudry S., Kuppler S. und Smeddinck U. (2016) Inter- und Transdisziplinarität als Voraussetzung bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. *atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie* 61 (3), 199–202
- Chaudry S. und Plischke E. (2016) Wissenschaftliche Synthese bei der Forschung zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe in der Forschungsplattform ENTRIA. In: Smeddinck U., Kuppler S. und Chaudry S. (Hrsg.) Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Springer Vieweg, 121–128
- Eckhardt A. (2016) Public participation and safety. Considering different notions of risk in the safety assessment of potential siting areas? In: Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (Hrsg.) 2. *Key Topics in Deep Geological Disposal. Conference Report* (Konferenzband). KIT Scientific Publishing
- Eckhardt A. (2016) Comparative assessment of uncertainties and risks associated with different disposal options for radioactive waste. Proving futures and governing uncertainties in technosciences and megaprojects. In: Agence national pour la gestion des déchets radioactifs (Hrsg.) *Proving Futures and Governing Uncertainties in Technosciences and Megaprojects* (Konferenzband). Châtenay-Malabry
- Eckhardt A. et al. (2016) Risikolandschaft. In: Smeddinck U., Kuppler S. und Chaudry S. (Hrsg.) Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Springer Fachmedien Wiesbaden, 59–65
- Eckhardt A. und Rippe K. P. (2016) Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Vdf Hochschulverlag AG
- Grunwald A. (2016) Wissensintegration auf dem Weg zur Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle. In: Smeddinck U., Kuppler S. und Chaudry S. (Hrsg.) Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Springer Vieweg, 111–119

- Grunwald A. (2016) Der lange Weg zum Konsens. *Politische Ökologie* **34** (9), 124–127
- Häfner D. (2016) Geschichte(n) der Anti-Atom-Bewegung. *Forschungs-journal Soziale Bewegungen* **2016** (2), 108–110
- Hocke P. und Gallego Carrera D. (2016) Die Endlager-Kommission und ihr Konzept von Öffentlichkeitsarbeit in einem engen Zeitfenster. Denkanstöße und Implikationen zum Beteiligungsformat von Demos/Prognos für die Kommission. In: Müller M. C. M. (Hrsg.) Loccumer Protokolle. Endlagersuche. Endlager-Kommission und Öffentlichkeit(en): Fragen nach Zusammenarbeit und Fortschritten im Prozess zur Halbzeit der Kommission. Evangelische Akademie Loccum, 103–118
- Kalmbach K. und Röhlig K.-J. (2016) Interdisciplinary Perspectives on Dose Limits in Radioactive Waste Management. A Research Paper Developed within the ENTRIA Project. *Journal of Radiological Protection* **36** (2), 8–22
- Kattau A. (2016) ENTRIA – Werkstattgespräch: Emotionen bei der Realisierung eines Endlagers für Atom Müll. *atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie* **61** (8/9), 555–556
- König C. (2016) Einführung in den Strahlenschutz – Grundlagen, Grenzwertkonzepte, Heterogenität. In: Smeddinck U. und König C. (Hrsg.) Grenzwertbildung im Strahlenschutz – Physik, Recht, Toxikologie: Grundlagen, Kontraste, Perspektiven. Berliner Wissenschafts-Verlag, 21–40
- Kuppler S., Chaudry S. und Smeddinck U. (2016) Die Entsorgung radioaktiver Reststoffe als inter- und transdisziplinäre Herausforderung – eine Einführung. In: Smeddinck U., Kuppler S. und Chaudry S. (Hrsg.) Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Springer Vieweg, 01–08
- Marti M. (2016) Risikoansichten. Wie Merkmale der Person, der Quelle und des Rahmens die Art und Weise beeinflussen, wie Personen die mit der Entsorgung von radioaktiven Abfällen verbundenen Risiken wahrnehmen und bewerten. ENTRIA-Arbeitsbericht 05
- Mbah M. (2016) Bergwerk als technologisches Artefakt. Ein Beitrag zur untertägigen Entsorgung radioaktiver Abfälle aus Perspektive der Technikfolgenabschätzung. ENTRIA-Arbeitsbericht 06
- Metz V. (2016) Interdisziplinäre Analysen von Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe – der Beitrag geochemisch-basierter Analysen. In: Smeddinck U., Kuppler S. und Chaudry S. (Hrsg.) Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Springer Fachmedien Wiesbaden, 17–23

- Pönitz E. und Tawussi F. (2016) Schutz vor ionisierender Strahlung – Ein Einblick in die Disziplin und interdisziplinäre Verknüpfungspunkte. In: Smeddinck U., Kuppler S. und Chaudry S. (Hrsg.) Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Springer Fachmedien Wiesbaden, 49–58
- Riemann M. und Köhnke D. (2016) Interdisziplinarität als Induktion – Von Ingenieuren und Philosophen. In: Smeddinck U., Kuppler S. und Chaudry S. (Hrsg.) Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Springer Vieweg, 105–110
- Röhlig K.-J. et al. (2016) Zwischenbericht des Verbundvorhabens ENTRIA 2013 – 2015: Ergebnisse, Arbeitsstand und Leistungsbilanz. Interner Bericht. Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen
- Röhlig K.-J. und Hocke P. (2016) Safety Case, Interdisziplinarität und Transdisziplinarität. In: Smeddinck U., Kuppler S. und Chaudry S. (Hrsg.) Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Springer Vieweg, 77–88
- Schulz C. (2016) Fonds oder Rückstellungen? Atommüll als Private Good und Public Bad. In: Brunnengräber A. (Hrsg.) Problemfälle Endlager – Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll. edition sigma, 261–288
- Seier S. (2016) Mal mehr, mal weniger Partizipation. Die Suche nach einem Atommüll-Endlager in Frankreich und Schweden im Vergleich. In: Brunnengräber A. (Hrsg.) Problemfälle Endlager – Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll. edition sigma, 359–388
- Semper F. (2016) ENTRIA – Werkstattgespräch „Umwelt, Gerechtigkeit, Freiwilligkeit – insbesondere bei der Realisierung eines Endlagers für Atommüll“ an der TU Braunschweig. *Zeitschrift für Europäisches Umwelt- und Planungsrecht (EurUP)* 14 (2), 164–166
- Smeddinck U., Kuppler S. und Chaudry S. (Hrsg.) (2016) Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Springer Vieweg
- Smeddinck U. und König C. (Hrsg.) (2016) Grenzwertbildung im Strahlenschutz – Physik, Recht, Toxikologie. Grundlagen, Kontraste, Perspektiven. Berliner Wissenschafts-Verlag
- Smeddinck U. und König C. (2016) Grenzwertbildung im Strahlenschutz – Zur Einführung. In: Smeddinck U. und König C. (Hrsg.) Grenzwertbildung im Strahlenschutz – Physik, Recht, Toxikologie. Grundlagen, Kontraste, Perspektiven. Berliner Wissenschafts-Verlag, 11–20
- Walther C. et al. (2016) Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Abfälle. Die Schaffung interdisziplinärer Bewertungsgrundlagen in ENTRIA.

- In: Bucher B. und Wilhelm C. (Hrsg.) *Strahlenschutz für Mensch und Umwelt – 50 Jahre Kompetenz im Fachverband. Jahrestagung 2016* (Konferenzband). Fachverband für Strahlenschutz e.V. 29–36
- Wulf N., Kühl Y. und Wittstock F. (2016) Beteiligung lernen. Diskussionsbeitrag anlässlich des „Bürgerdialogs Standortsuche“ der Endlager-Kommission. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 25 (1), 83–89

2017

- Anton D. et al. (2017) Der Rückbau kerntechnischer Anlagen: Eine interdisziplinäre Aufgabe für Nachwuchskräfte. In Vorbereitung
- Bailey L. et al. (2017) Communication on the Safety Case for Deep Geological Repository. NEA No. 7336. Organisation for Co-operation and Development, Paris
- Chaudry S. et al. (2017) Rhetorik in diskursiver Absicht: Plädoyers und Gegenreden beim Projekttreffen 2015 in Braunschweig. Interner Bericht. Institut für Endlagerforschung
- Driftmann C. (2017) Das Endlagerkonzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Eine interdisziplinäre Betrachtung. Berliner Wissenschafts-Verlag
- Eckhardt A. (2017) Monitoring im schweizerischen Konzept des geologischen Tiefenlagers. In: Hocke P., Kuppler S. und Smeddinck U. (Hrsg.) *Technical Monitoring and Long-term Governance. Planning for the Future.* edition sigma. Im Erscheinen
- Eckhardt A., Kreusch J. und Neumann W. (2017) Vergleichende Risikobewertung von Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Reststoffe. ENTRIA-Arbeitsbericht. In Vorbereitung
- Häfner D. (2017) German Experiences in Public Participation Concerning Nuclear Facilities. In: Russian Federation national nuclear corporation (Hrsg.) *Proceedings conference „Nuclear Energy, Environment, Safety – 2016“* Rosatom. Moskau. Im Erscheinen
- Hassel T. et al. (2017) Das ENCON Behälterkonzept – Generische Behältermodelle zur Einlagerung radioaktiver Reststoffe für den interdisziplinären Optionenvergleich. Interner Bericht. Institut für Werkstoffkunde. In Vorbereitung
- Hassel T. und Köhler A. (2017) Die Bedeutung der Rückholbarkeit als Option im Zusammenhang mit dem Wunsch und der Notwendigkeit eines Langzeit-Monitoring. In: *Workshop Proceedings „Technical Monitoring*

- and Long-term Governance" (Konferenzband). edition sigma. In Vorbereitung
- Jänsch E. et al. (2017) Wer soll die Zeche zahlen? Diskussion alternativer Organisationsmodelle zur Finanzierung von Rückbau und Endlagerung. *GAIA. Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2), 118–120
- Kim S. K. (2017) Atomenergiepolitik und Anti-Atomkraft-Bewegung der Republik Korea 1978–2015. Dissertation. Forschungszentrum für Umweltpolitik. Im Erscheinen
- Köhler A. (2017) Interventionstechniken für Zwischenlagerbehälter. In: Köhnke D., Semper F. und Reichardt M. (Hrsg.) Längerfristige Aufbewahrung hoch radioaktiver Reststoffe in Oberflächenanlagen – Diskussionsbeiträge zu den aktuellen Entwicklungen der deutschen Entsorgungsstrategie. Springer Vieweg
- Kuppler S. et al. (Hrsg.) (2017) Bearbeiterband Erfahrungen mit Interdisziplinarität. In Vorbereitung
- Lux K.-H., Wolters R. und Zhao J. (2017) Direktes Monitoring des Tiefenlagerverhaltens mit Hilfe von Überwachungssohle und Messbohrlöchern – ein Beitrag zur Vermittlung zwischen Technik und Gesellschaft? In: Hocke P. et al. (Hrsg.) Technical Monitoring and Long-term Governance. Planning for the Future. edition sigma. In Vorbereitung
- Neumann W. und Kreusch J. (2017) Sicherheitsfunktionen und Robustheitsdefizite: Vergleich der ENTRIA-Referenzmodelle. Interner Bericht. risicare GmbH. In Vorbereitung
- Ott K. und Semper F. (2017) Nicht von meiner Welt – Zukunftsverantwortung bei der Endlagerung von radioaktiven Reststoffen. *GAIA. Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2), 100–102
- Pang B., Saurí Suárez H. und Becker F. (2017) Monte Carlo based study of radiation field in a deep geological repository for high-level nuclear waste with different host rock types. *Nuclear Engineering and Design* (325), 44–48
- Pönitz E. (2017) Wärmeentwicklung und Radionuklid-Inventar. In: Semper F., Reichardt M. und Köhnke D. (Hrsg.) Längerfristige Aufbewahrung hoch radioaktiver Reststoffe in Oberflächenanlagen – Diskussionsbeiträge zu den aktuellen Entwicklungen der deutschen Entsorgungsstrategie. Springer Vieweg, 29–50
- Röhlig K.-J. (2017) Endlagerforschung: Technische Herausforderungen vor dem Hintergrund gesellschaftlicher Konflikte. In: *Jahrbuch der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft* (Konferenzband). Cramer Verlag, 100–114

- Röhlig K.-J. et al. (2017) Einschluss oder Zugriff. Tiefenlagerung mit oder ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit – ein Optionenvergleich. *GAIA. Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2), 114–117
- Röhlig K.-J. et al. (2017) Bericht zur Evaluierung des Forschungsvorhabens ENTRIA 2017. Interner Bericht. Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen
- Röhlig K.-J. und Eckhardt A. (2017) Primat der Sicherheit – Ja, aber welche Sicherheit ist gemeint? *GAIA. Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2), 103–105
- Semper F. (2017) ITAS-Summerschool 2015: TA und Entsorgung – Ein Erfahrungsbericht. In: Kuppler S. et al. (Hrsg.) *Bearbeiterband Erfahrungen mit Interdisziplinarität*. Berliner Wissenschaftsverlag. In Vorbereitung
- Smeddinck U. (2017) Bedeutung der Interdisziplinarität im Forschungverbund ENTRIA – (m)eine Geschichte. In: Kuppler S. et al. (Hrsg.) *Bearbeiterband Erfahrungen mit Interdisziplinarität*. In Vorbereitung
- Themann D. und Brunnengräber A. (2017) Sozialökologische Herausforderungen im Zeitalter des Anthropozän. Das Beispiel der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. In: Müller M. C. M. (Hrsg.) *Loccumer Protokolle. Endlagersuche: Wie steht es um die Vorbereitung der Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland?*. Evangelische Akademie Loccum, 13–28
- Walther C. und Riemann M. (2017) Wie viel Strahlendosis für wen? Lange Lagerung, Offenhaltung und ein langer Entsorgungsprozess bedeuten zusätzliche Dosis für Beschäftigte. *GAIA. Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2), 106–109

2018

- Brunnengräber A. et al. (Hrsg.) (2018) *Challenges of Nuclear Waste Governance. An International Comparison (Vol. II)*. Springer VS
- Brunnengräber A. et al. (Hrsg.) (2018) *Governing Nuclear Waste. Conflicts, Participation and Acceptance (Vol. III)*. Springer Fachmedien Wiesbaden. In Vorbereitung
- Drögemüller C. (2018) *Schlüsselakteure der Endlager-Governance. Entsorgungsoptionen und -strategien aus Sicht regionaler Akteure*. Springer VS
- Hocke P. et al. (Hrsg.) (2018) *Technisches Monitoring und Long-term Governance*. edition sigma. In Vorbereitung

- Hocke P. und Kuppler S. (2018) Challenges of Long-term Governance in Nuclear Waste Management. Introduction. In: Hocke P. et al. (Hrsg.) Technisches Monitoring und Long-term Governance. edition sigma. Im Erscheinen
- Ott K. und Smeddinck U. (Hrsg.) (2018) Umwelt, Gerechtigkeit, Freiwilligkeit – insbesondere bei der Realisierung eines Endlagers. Berliner Wissenschafts-Verlag
- Smeddinck U. (2018) Recht, Atommüll und Emotionen – Eine Annäherung an verschiedene Facetten des Konfliktfeldes. In: Smeddinck U. (Hrsg.) Emotionen bei der Realisierung eines Endlagers. Berliner Wissenschafts-Verlag
- Smeddinck U. (Hrsg.) (2018) Emotionen bei der Realisierung eines Endlagers. Berliner Wissenschafts-Verlag
- Themann D. und Brunnengräber A. (2018) The Nuclear Legacy in the Anthropocene. On the Dynamics of the Interrelations between Nature, Technology and Society. Routberg. In Vorbereitung

8.2 Disziplinäre Veröffentlichungen

2013

- Brunnengräber A. (2013) Die Anti-AKW-Bewegung im Wandel. Neue Herausforderungen durch die Endlagersuche für radioaktive Abfälle. *Forschungsjournal Soziale Bewegungen – PLUS* 26 (3)
- Drögemüller C. (2013) Gegenwartsanalyse der Bewertung von Entsorgungsoptionen und -strategien radioaktiver Abfälle aus Sicht kommunaler Entscheidungsträger und lokaler Bevölkerung. Interner Bericht. Institut für Radioökologie und Strahlenschutz
- Häußler S. (2013) Hydrogeochemische Modellierung der langzeitlichen Auswirkungen der Denitrifikation auf die Grundwasserbeschaffenheit und auf das Feststoffgerüst eines Grundwasserleiters. Dissertation. Institut für Endlagerforschung
- Hocke P. (2013) Nach dem Konsens ist vor dem Konsens. Deutsche Endlagerkonflikte zwischen Gesetzgebung und simulierter Bürgernähe? In: Müller M. C. M. (Hrsg.) Loccumer Protokolle. Endlagersuche – gemeinsam mit den Bürgern! Information – Konsultation – Dialog – Beteiligung. Evangelische Akademie Loccum, 121–131
- Roßegger U. und Smeddinck U. (2013) Materialien zur Endlagersuchgesetzgebung III. RATUBS, 2013 (02). Institut für Rechtswissenschaften

- Schreurs M. A. (2013) The International Reaction to the Fukushima Nuclear Accident and Implications for Japan. In: Yoshida F. und Schreurs M. A. (Hrsg.) Fukushima: A Political Economic Analysis of a Nuclear Disaster. Hokkaido University Press, 01–20
- Schreurs M. A. (2013) Orchestrating a Low-Carbon Energy Revolution Without Nuclear: Germany's Response to the Fukushima Nuclear Crisis. *Theoretical Inquires in Law. Reaching International Cooperation on Climate Change Mitigation* 14 (1), 83–108
- Smeddinck U. (2013) Radioaktive Reststoffe. Lösungsoptionen aus Sicht der Rechtswissenschaft. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 22 (3), 46–49
- Smeddinck U. und Roßegger U. (2013) Materialien zum Standortauswahlgesetz. RATUBS, 2013 (03). Institut für Rechtswissenschaften

2014

- Borgonovo E. et al. (2014) Transformations and invariance in the sensitivity analysis of computer experiments. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B* 76 (5), 925–947
- Brunnengräber A. et al. (2014) Nuclear Waste Governance – ein wicked problem der Energiewende. In: Brunnengräber A. und Di Nucci M. R. (Hrsg.) Im Hürdenlauf zur Energiewende. Von Transformationen, Reformen und Innovationen. Springer Fachmedien Wiesbaden, 389–399
- Brunnengräber A. und Di Nucci M. R. (2014) Wettlauf der Systeme. Der Startschuss für das Rennen zwischen fossilen und erneuerbaren Energien ist gefallen. In: Brunnengräber A. und Di Nucci M. R. (Hrsg.) Im Hürdenlauf zur Energiewende. Von Transformationen, Reformen und Innovationen. Springer Fachmedien Wiesbaden, 15–31
- Brunnengräber A. und Häfner D. (2014) Alles neu in der Akteurslandschaft der „Endlagersuche“? *anti atom aktuell* 246, 21–22
- Brunnengräber A. und Hocke P. (2014) Bewegung Pro-Endlager? Zum soziotechnischen Umgang mit hochradioaktiven Reststoffen. *Forschungsjournal Soziale Bewegungen* 27 (4), 59–70
- Brunnengräber A. und Mez L. (2014) Strahlende Hinterlassenschaften aus Produktion und Konsumtion. Zur Politischen Ökonomie des Atommülls. *PROKLA. Zeitschrift für kritische Sozialwissenschaft* 44 (3), 371–382
- Budelmann H., Wachmann A. und Holst A. (2014) Incorporation of Concrete Rehabilitation Measures into Life-Cycle Maintenance. In: Council

- on Disaster Risk Management (Hrsg.) Sustainable Development of Critical Infrastructure. American Society of Civil Engineers, 141–148
- Gupta D. K. et al. (2014) Role of phosphate fertilizers in heavy metal uptake and detoxification of toxic metals. *Chemosphere* (108), 134–144
- Gupta D. K. und Walther C. (Hrsg.) (2014) Radionuclide Contamination and Remediation Through Plants. Springer International Publishing
- Häfner D. (2014) Die Perspektiven der Anti-AKW-Bewegung im Kontext der „Endlagersuche“. *Forschungsjournal Soziale Bewegungen* 27 (4), 142–146
- Hohmuth T. (2014) Die atomrechtspolitische Entwicklung in Deutschland seit 1980. Darstellung, Analyse, Materialien. Berliner Wissenschafts-Verlag
- Missal C., Döring I. und Stahlmann J. (2014) Comparison of Triaxial Strength Tests of Clean Halite and Argillaceous Halite from the WIPP. In: American Rock Mechanics Association (Hrsg.) *48th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 1–4 June, Minneapolis, Minnesota* (Konferenzband)
- Mitra A. et al. (2014) Mechanism of Metal Transporters in Plants. In: Gupta D. K. und Chatterjee S. (Hrsg.) Heavy Metal Remediation: Transport and Accumulation in Plants. Nova Science Publishers Inc, 01–28
- Ott K. (2014) Handeln auf Probe für die Ewigkeit? Die Einlagerung hochradioaktiver atomarer Reststoffe als eine Generationenaufgabe. In: Karafyllis N. C. (Hrsg.) Das Leben führen? Lebensführung zwischen Technikphilosophie und Lebensphilosophie. Für Günther Ropohl zum 75. Geburtstag. edition sigma, 240–259
- Ott K. und Riemann M. (2014) Das MiniMax Kriterium in der Risikoethik. Arbeitspapier zum 3. ENTRIA Jahrestreffen. Interner Bericht. Lehrstuhl für Philosophie und Ethik der Umwelt
- Plischke E. und Borgonovo E. (2014) What about totals? Alternative approaches to factor fixing. In: Steenberger R. D. J. M. et al. (Hrsg.) *Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon. Proceedings of the ESREL 2013 Conference held in Amsterdam* (Konferenzband). CRC Press, 3339–3344
- Schreurs M. A. (2014) The Ethics of Nuclear Energy: Germany's Energy Politics after Fukushima. *The Journal of Social Science* 77, 09–29
- Smeddinck U. (2014) Elemente des Standortauswahlgesetzes zur Entsorgung radioaktiver Abfälle – Vorgeschichte, Zuschnitt und Regelungskomplexe. *Deutsches Verwaltungsblatt* 129 (7), 408–416
- Smeddinck U. (Hrsg.) (2014) Das Recht der Atomentsorgung. Textsammlung mit Einführung. Berliner Wissenschafts-Verlag

- Smeddinck U. und Willmann S. (2014) Die Kommissionsempfehlung nach §4 Abs. 5 Standortauswahlgesetz. *Zeitschrift für Europäisches Umwelt- und Planungsrecht* 12 (2), 102–111
- Stahlmann J., Mintzlaß V. und Léon Vargas R. P. (2014) Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe. Interner Bericht. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Stahlmann J., Missal C. und Pruter J. (2014) Messdaten versus Modellvorstellungen – Erfahrungen am in-situ Versuchsbauwerk im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben. In: Stahlmann J. (Hrsg.) Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig. Braunschweig, 243–260

2015

- Blanco Martín L. et al. (2015) Comparison of two simulators to investigate thermal-hydraulic-mechanical processes related to nuclear waste isolation in saliferous formations. *Computers and Geotechnics* 66, 219–229
- Bozau E., Sattler C.-D. und van Berk W. (2015) Hydrogeochemical classification of deep formation waters. *Applied Geochemistry* (52), 23–30
- Brunnengräber A. (2015) Ewigkeitslasten. Die „Endlagerung“ radioaktiver Abfälle als soziales, politisches und wissenschaftliches Projekt. edition sigma
- Brunnengräber A. et al. (Hrsg.) (2015) Nuclear Waste Governance. An International Comparison. Springer Fachmedien Wiesbaden
- Brunnengräber A. und Häfner D. (2015) Herrschaftsverhältnisse in der Mehrebenen-Governance der nuklearen Entsorgung. *Zeitschrift für Politikwissenschaft Sonderheft 2015* (2), 55–72
- Brunnengräber A. und Häfner D. (2015) „Endlager“ gesucht. *Robin Wood Magazin* 126 (3), 28–29
- Brunnengräber A. und Schreurs M. A. (2015) Nuclear Energy and Nuclear Waste Governance Perspectives after the Fukushima Nuclear Disaster. In: Brunnengräber A. et al. (Hrsg.) Nuclear Waste Governance. An International Comparison. Springer Fachmedien Wiesbaden, 47–78
- Budelmann H., Dreßler I. und Wichmann H.-J. (2015) Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures with an Innovative rf-based Sensor. In: *Proceedings NDT-CE* (Konferenzband). Berlin
- Di Nucci M. R. (2015) Breaking the Stalemate. The Challenge of Nuclear Waste Governance in Italy. In: Brunnengräber A. et al. (Hrsg.) Nuclear Waste Governance. An International Comparison. Springer Fachmedien Wiesbaden, 299–322

- Di Nucci M. R., Isidoro Losada A. M. und Brunnengräber A. (2015) Same, Same but Different – A Comparative Perspective on Participation and Acceptance in Siting Procedures for HLW repositories in France, Sweden and Finland. In: Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (Hrsg.) *Key Topics in Deep Geological Disposal: Conference Report, Köln 2014* (Konferenzband). KIT Scientific Publishing, 42–48
- Di Nucci M. R. et al. (2015) Comparative Perspectives on Nuclear Waste Governance. In: Brunnengräber A. et al. (Hrsg.) *Nuclear Waste Governance. An International Comparison*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 25–43
- Di Nucci M. R. und Isidoro Losada A. M. (2015) An Open Door for Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Export? In: Brunnengräber A. et al. (Hrsg.) *Nuclear Waste Governance. An International Comparison*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 79–97
- Häfner D. (2015) Das Standortauswahlgesetz und die Anti-Atomkraft-Bewegung. *Sozialwissenschaftliche Umweltfragen: Berichte & Arbeitspapiere / Reports & Working Papers* 05
- Hocke P. (2015) Nuclear Waste Repositories and Ethical Challenges. In: Wyss M. und Peppoloni S. (Hrsg.) *Geoethics. Ethical Challenges and Case Studies in Earth Science*. Elsevier, 359–367
- Hocke P. (2015) Erweiterte Öffentlichkeitsbeteiligung bei der nuklearen Entsorgung. Deutschland und Schweiz im Vergleich. In: Bogner A., Decker M. und Sotoudeh M. (Hrsg.) *Responsible Innovation. Neue Impulse für die Technikfolgenabschätzung*. edition sigma, 185–196
- Hocke P. und Kuppler S. (2015) Participation under Tricky Conditions. The Swiss Nuclear Waste Strategy Based on the Sectoral Plan. In: Brunnengräber A. et al. (Hrsg.) *Nuclear Waste Governance. An International Comparison*. Springer VS, 157–176
- Inouhe M. et al. (2015) General Roles of Phytochelatins and Other Peptides in Plant Defense Mechanisms Against Oxidative Stress/Primary and Secondary Damages Induced by Heavy Metals. In: Gupta D. K., Palma J. M. und Corpas F. J. (Hrsg.) *Reactive Oxygen Species and Oxidative Damage in Plants Under Stress*. Springer International Publishing, 219–245
- Isidoro Losada A. M. (2015) Subject to Political Capture? Nuclear Waste Governance in Spain. In: Brunnengräber A. et al. (Hrsg.) *Nuclear Waste Governance. An International Comparison*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 323–342
- Kalmbach K. (2015) From Chernobyl to Fukushima. The Impact of the Accidents on the French Nuclear Discourse. In: Bohn T. et al. (Hrsg.) *The Impact of Disaster: Social and Cultural Approaches to Fukushima and Chernobyl*. Verlag für Wissenschaft und Praxis, 67–95

- Kreusch J. et al. (2015) Referenzkonzepte Tiefenlagerung. Ergebnisbericht des Abstimmungstreffens, Braunschweig 23.06.2015. Interner Bericht. risicare GmbH
- Kreusch J. und Neumann W. (2015) Vergleichende Bewertung von Referenzoptionen mit Hilfe von Sicherheitsfunktionen, Systemrobustheiten, Robustheitsdefiziten sowie der Risiken menschlichen Handelns. Interner Bericht. risicare GmbH
- Kuppler S. und Grunwald A. (2015) The Swiss Approach to Finding Compromises in Nuclear Waste Governance. In: Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (Hrsg.) *Key Topics in Deep Geological Disposal: Conference Report, Köln 2014* (Konferenzband). KIT Scientific Publishing, 36–41
- Kuppler S. und Hocke P. (2015) „Enabling“ public participation in a social conflict. The role of long-term planning in nuclear waste governance. Interner Bericht. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
- Kuppler S. und Hocke P. (2015) „Enabling“ Public Participation in a Social Conflict. The Role of Long-Term Planning in Nuclear Waste Governance. In: Scherz C. et al. (Hrsg.) *The Next Horizon of Technology Assessment – Proceedings from the PACITA 2015 Conference in Berlin* (Konferenzband). Prag, 121–125
- Li X. (2015) Entwicklung der Softwareplattform RESUS: Repository Simulation, Uncertainty propagation and Sensitivity Analysis. Dissertation. Institut für Endlagerforschung
- Moll H., Lütke L. und Cherkouk A. (2015) Bacterial Diversity in Clay and Actinide Interactions with Bacterial Isolates in Relation to Nuclear Waste Disposal. In: Walther C. und Gupta D. K. (Hrsg.) *Radionuclides in the Environment*. Springer International Publishing, 209–229
- Neumann W. (2015) Recherche für das zu berücksichtigende Radioaktivitätsinventar bei den ENTRIA-Referenzoptionen. Bericht für die ENTRIA-Vertikalprojekte. Interner Bericht. risicare GmbH
- Ott K. (2015) Ein Plädoyer für Mausoleen. Interner Bericht. Lehrstuhl für Philosophie und Ethik der Umwelt
- Plischke E. und Borgonovo E. (2015) Copula-based Sensitivity Measures of Computer Experiments. In: *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems. Proceedings of the 25th European Safety and Reliability Conference held in Zürich, Switzerland, September 7–10, 2015* (Konferenzband). CRC Press, 2595–2602
- Pohlers J. und Riemann M. (2015) Dokumentation Bürgerforum „Wohin mit unserem Atommüll?“. Interner Bericht. Lehrstuhl für Philosophie und Ethik der Umwelt

- Riemann M. (2015) Taking out the Trash – Radioactive Waste, Technology Assessment and Democracy. *Journal of Philosophical Research. Selected Papers from the XXIII World Congress of Philosophy* (40 Supplement), 259–262
- Stahlmann J., Missal C. und Gährken A. (2015) Interaktionen zwischen Abdichtungsbauwerk und Wirtsgestein im Steinsalz. *Bautechnik* **92** (5), 370–376
- Stahlmann J., Missal C. und Gährken A. (2015) Interaction between salt concrete sealing structures and rock salt. In: *Mechanical Behaviour of Salt VIII* (Konferenzband). CRC Press, 153–158
- Stahlmann J. et al. (2015) Geological and Geotechnical Limitations of Radioactive Waste Retrieval in Geologic Disposals. In: Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (Hrsg.) *Key Topics in Deep Geological Disposal. Conference Report* (Konferenzband). KIT Scientific Publishing, 79–84
- Stahlmann J. et al. (2015) Sustainable Lining in Incompetent Rock Mass using the Example of Konrad Mine. In: Austrian Society for Geomechanics (Hrsg.) *ISRM Regional Symposium – EUROCK 2015, 7–10 October, Salzburg, Austria* (Konferenzband). Salzburg, 9–14
- Voss I. (2015) Die Verteilung löslicher Radionuklid-relevanter Spurenelemente zwischen Salzmineralen und salinaren Lösungen. Dissertation. Institut für Endlagerforschung
- Walther C. und Gupta D. K. (Hrsg.) (2015) Radionuclides in the Environment. Springer International Publishing
- Wulf N. (2015) Die schwedische Endlagersuche. Zur Rolle von Expertise und der Kommunikation von Wissen. Interner Bericht. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
- Wulf N., Wittstock F. und Kühl Y. (2015) Auf Augenhöhe? Beteiligung lernen in der Endlagerdebatte. *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* **24** (3), 132–136

2016

- Blanco Martín L. et al. (2016) Thermal-hydraulic-mechanical modeling of a large-scale heater test to investigate rock salt and crushed salt behavior under repository conditions for heat-generating nuclear waste. *Computers and Geotechnics* **77**, 120–133
- Borgonovo E., Hazen G. B. und Plischke E. (2016) A Common Rationale for Global Sensitivity Measures and Their Estimation. *Risk Analysis* **36** (10), 1871–1895

- Borgonovo E. und Plischke E. (2016) Sensitivity analysis: A review of recent advances. *European Journal of Operational Research* **248** (3), 869–887
- Bozau E. et al. (2016) Hydrogeochemische Modellierungen zum Verhalten von Salzlösungen bei Abkühlung. In: Blum P. et al. (Hrsg.) *Grundwasser – Mensch – Ökosysteme : 25. Tagung der Fachsektion Hydrogeologie in der DGGV 2016, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 13.-17. April 2016* (Konferenzband). KIT Scientific Publishing, 95
- Bozau E. und Voss I. (2016) Variationsbreite der chemischen Zusammensetzung von Grundwässern im Kontakt zu Salzformationen. In: Blum P. et al. (Hrsg.) *Grundwasser – Mensch – Ökosysteme : 25. Tagung der Fachsektion Hydrogeologie in der DGGV 2016, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 13.-17. April 2016* (Konferenzband). KIT Scientific Publishing, 94–95
- Brunnengräber A. (2016) Das wicked problem der Endlagerung. Zehn Charakteristika des komplexen Umgangs mit hochradioaktiven Reststoffen. In: Brunnengräber A. (Hrsg.) *Problemfälle Endlager – Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll.* edition sigma, 145–166
- Brunnengräber A., Mez L. und Schreurs M. A. (2016) Das Endlager-Dilemma. Über den Umgang mit Atommüll. In: Leitschuh H. et al. (Hrsg.) *Jahrbuch Ökologie 2016*. S. Hitzel, 182–190
- Brunnengräber A. und Mez L. (2016) Der staatlich-industrielle Atomkomplex im Zerfall. Zur politischen Ökonomie der Endlagerung in der Bundesrepublik Deutschland. In: Brunnengräber A. (Hrsg.) *Problemfälle Endlager – Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll.* edition sigma, 289–311
- Brunnengräber A. und Syrovatka F. (2016) Konfrontation, Kooperation oder Kooptation? Staat und Anti-Atom-Bewegung im Endlagersuchkonzept. *Prokla Zeitschrift für kritische Sozialwissenschaft* **184** (46), 383–402
- Budelmann H., Dreßler I. und Wichmann H.-J. (2016) Subsequent sensor installation for corrosion monitoring of reinforced concrete structures. In: International Association for Life Cycle Civil Engineering (Hrsg.) *Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure: Proceedings of the Fifth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2016)*, 16–19 October 2016, Delft, The Netherlands. CRC Press, 225–226
- Chaudry S., Mintzlaff V. und Stahlmann J. (2016) Der Beitrag der Geologie zur Tiefenlagerung hoch radioaktiver Reststoffe. In: Smeddinck U., Kuppler S. und Chaudry S. (Hrsg.) *Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe*. Springer Vieweg, 37–47

- Drögemüller C. (2016) Das Standortauswahlverfahren. Kommunen und BürgerInnen in der Endlager-Governance. In: Brunnengräber A. (Hrsg.) Problemfalle Endlager – Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atom Müll. edition sigma, 187–210
- Gupta D. K. et al. (2016) Radionuclides: Accumulation and transport in plants. In: Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Vol. 241. Springer International Publishing, 139–160
- Gupta D. K. et al. (2016) Moderate Uranium Disturbs the Nutritional Status and Induces an Oxidative Stress in Pisum sativum L. *Journal of Plant Physiology and Pathology* 4 (1)
- Häfner D. (2016) Die Politikwissenschaft und Nuclear Waste Governance. In: Smeddinck U., Kuppler S. und Chaudry S. (Hrsg.) Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Springer Fachmedien Wiesbaden, 09–12
- Häfner D. (2016) Screening der Akteure im Bereich der Endlagerstandortsuche für radioaktive Reststoffe in der Bundesrepublik Deutschland. Das „Who is who“ eines sich verändernden Konfliktfeldes. ENTRIA-Arbeitsbericht 04
- Häfner D. (2016) Kontinuitäten?! Die Entwicklung der Akteurslandschaft in Bezug auf die Endlager-Governance. In: Brunnengräber A. (Hrsg.) Problemfalle Endlager – Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atom Müll. edition sigma, 169–186
- Häfner D. (2016) Geschichte(n) der Anti-Atom-Bewegung. *Robin Wood Magazin* 128 (1)
- Hocke P. (2016) Technik oder Gesellschaft? Atom Müll als sozio-technische Herausforderung begreifen. In: Brunnengräber A. (Hrsg.) Problemfalle Endlager – Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atom Müll. edition sigma, 77–96
- Kuppler S. (2016) Modellfall(e) Schweiz. Was aus der Standortsuche gelernt und generalisiert werden kann. In: Brunnengräber A. (Hrsg.) Problemfalle Endlager – Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atom Müll. edition sigma, 339–358
- Léon Vargas R. P. und Stahlmann J. (2016) Thermal impact in the geometrical settings in deep geological repositories for HLW with retrievability. In: *Proceedings of Annual Waste Management Symposium /WM 2016*, 6.-10.03.2016, Phoenix, Arizona, USA (Konferenzband). WM Symposia
- Li Q. (2016) Rechnerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Endlagerhohlräumen im Opalinustongebirge anhand von mechanischen/hydromechanisch-gekoppelten (undrainierten und drainierten) Simu-

- lationen. Dissertation. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
- Marti M. (2016) Risikoansichten. Wie Personen das Risiko der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle wahrnehmen und bewerten. In: Brunnengräber A. (Hrsg.) Problemfalle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atom Müll. edition sigma, 97–118
- Marti M., Hocke P. und Walther C. (2016) Projektkommunikation ENTRIA, Kommunikationskonzept. Interner Bericht. risicare GmbH
- Mez L. (2016) INES – Die Internationale Bewertungsskala für nukleare Ereignisse. *Dossier: Tschernobyl*
- Pang B., Saurí Suárez H. und Becker F. (2016) Individual Dosimetry in Disposal Repository of Heat-Generating Nuclear Waste. *Radiation Protection Dosimetry* **170** (1–4), 387–392
- Pang B., Saurí Suárez H. und Becker F. (2016) Monte Carlo based investigation of a universal two-component albedo neutron dosimeter in a deep geological disposal system for high-level nuclear waste. *Annals of Nuclear Energy* (98), 81–89
- Pang B. und Becker F. (2016) Albedo neutron dosimetry in a deep-geological disposal system for high-level nuclear waste. *Radiation Protection Dosimetry* **174** (3), 308–314
- Plischke E. und Borgonovo E. (2016) Gini out of the bottle. Global sensitivity analysis with distance correlation and energy statistics. In: Walls L., Revie M. und Bedford T. (Hrsg.) *Risk, Reliability and Safety. Innovating Theory and Practice. Proceedings of the 26th European Safety and Reliability conference ESREL 2016. Glasgow, Scotland, 25–29 September 2016* (Konferenzband). CRC Press, 2845–2852
- Röhlig K.-J. (2016) Techniken – Konzepte – Herausforderungen. Zur Endlagerung radioaktiver Reststoffe. In: Brunnengräber A. (Hrsg.) Problemfalle Endlager – Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atom Müll. edition sigma, 33–54
- Smeddinck U. (2016) Synergien oder Reibungsverluste? Wer koordiniert die Institutionen/Aktivitäten und führt sie zusammen? In: Müller M. C. M. (Hrsg.) Loccumer Protokolle. Endlagersuche. Endlager-Kommission und Öffentlichkeit(en): Fragen nach Zusammenarbeit und Fortschritten im Prozess zur Halbzeit der Kommission. Evangelische Akademie Loccum, 69–80
- Smeddinck U. (2016) Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Grenzwertfestlegung – eine Perspektive für die Strahlenschutzverordnung. In: Smeddinck U. und König C. (Hrsg.) Grenzwertbildung im Strahlenschutz – Physik, Recht, Toxikologie. Grundlagen, Kontraste, Perspektiven. Berliner Wissenschafts-Verlag, 81–112

- Smeddinck U. (2016) Atommüllentsorgung und robuste Rechtswissenschaft – Zugleich zum intradisziplinären Verständnis von Multi-, Inter- und Transdisziplinarität. In: Smeddinck U., Kuppler S. und Chaudry S. (Hrsg.) Inter- und Transdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Springer Fachmedien Wiesbaden, 25–36
- Smeddinck U. (2016) Innovative Ansätze im Umweltrecht. Standortauswahlgesetz und Nudge-Ansatz: rechtswissenschaftliche Forschung zu Emotionen und Verhalten als Perspektive. In: Hoffmann-Riem W. (Hrsg.) Schriften zur rechtswissenschaftlichen Innovationsforschung. Innovationen im Recht. Nomos, 403–437
- Smeddinck U. (2016) Umgang mit Ungewissheit bei der Realisierung eines Endlagers für Atommüll – resilient reguliert? In: Hill H. und Schliesky U. (Hrsg.) Verwaltungsressourcen und Verwaltungsstrukturen. Management von Unsicherheit und Nichtwissen. Nomos, 147–183
- Smeddinck U. (2016) Zwischen „weißer Landkarte“ und „schwarzem Loch“ – Endlagerkommission am Ende ihrer Laufzeit. *Zeitschrift für Rechtspolitik (ZRP)* 49 (6), 181–183
- Smeddinck U. und Semper F. (2016) Zur Kritik am Standortauswahlgesetz. Eine rechtswissenschaftliche Sicht auf gesellschaftspolitische Debatten. In: Brunnengräber A. (Hrsg.) Problemfälle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll. edition sigma, 235–260
- Stahlmann J., Mintzlaff V. und Léon Vargas R. P. (2016) Geotechnische und geologische Aspekte für Tiefenlagerkonzepte mit der Option der Rückholung der radioaktiven Reststoffe. *Bautechnik* 93 (3), 141–150
- Stahlmann J., Mintzlaff V. und Léon Vargas R. P. (2016) ENTRIA-Arbeitsbericht 03: Generische Tiefenmodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung. ENTRIA-Arbeitsbericht 03

2017

- Borgonovo E. et al. (2017) Making the Most out of a Hydrological Model Dataset: Sensitivity Analyses to Open the Model Black-Box. *Water Resource Research* 53 (9), 7933–7950
- Brunnengräber A. (2017) Jahrhundertprojekt Endlagerung. *GAIA. Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2), 110–117
- Brunnengräber A. (2017) Warum sich die Klimaforschung mit harten Machtverhältnissen beschäftigen muss. *GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (1), 13–15

- Brunnengräber A. und Di Nucci M. R. (2017) Freiwilligkeit als Königsweg bei der Standortsuche für radioaktive Reststoffe? In: Sommer J. (Hrsg.) Kursbuch Bürgerbeteiligung #2. Institut für Partizipation, 139–157
- Brunnengräber A. und Görg C. (2017) Nuclear waste in the Anthropocene. Uncertainties and unforeseeable time scales in the disposal of nuclear waste. *GAIA. Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2), 96–99
- Budelmann H. et al. (2017) Auf dem Weg in die Endlagerung. Die Notwendigkeit der langfristigen Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. *GAIA. Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2), 110–113
- Buser M. (2017) Chemotoxische Entsorgungseinrichtungen und ihre Governance in Langzeit-Perspektive. Interner Bericht. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse. In Vorbereitung
- Di Nucci M. R., Brunnengräber A. und Isidoro Losada A. M. (2017) From the „right to know” to the „right to decide”. A Comparative Perspective on Participation and Acceptance in Siting Procedures for HLW repositories. *Progress in Nuclear Energy* (100), 316–326
- Di Nucci M. R. und Brunnengräber A. (2017) In whose backyard? The wicked problem of siting nuclear waste repositories. *European Policy Analysis EPA – special issue „Infrastructure policy-making: between regional interests and societal goals?”* 3 (2), 295–323
- Drögemüller C. (2017) Gegenwartsanalyse der Bewertung von Entsorgungsoptionen und -strategien radioaktiver Abfälle aus Sicht kommunaler Entscheidungsträger und lokaler Bevölkerung. Dissertation. Institut für Radioökologie und Strahlenschutz
- Drögemüller C. und Kuppler S. (2017) Bürger(innen) auf Standortsuche. Erwartungen in Deutschland, Erfahrungen aus der Schweiz. *GAIA. Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2), 121–124
- Gupta D. K. et al. (2017) Investigation of low level Pu-242 contamination on nutrition disturbance and oxidative stress in *Solanum*. *Environmental Science and Pollution Research* 24 (19), 16050–16061
- Hocke P. und Smeddinck U. (2017) Robust-parlamentarisch oder informell-partizipativ? Die Tücken der Entscheidungsfindung in komplexen Verfahren. *GAIA. Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (2), 125–128
- Hofmann J. (2017) Kommentierung zu §§20, 29. In: Smeddinck U. (Hrsg.) StandAG. Standortauswahlgesetz. Kommentar. Berliner Wissenschafts-Verlag
- Isidoro Losada A. M., Di Nucci M. R. und Brunnengräber A. (Hrsg.) (2017) Nuclear Waste Governance in Argentina, Belgium, Bulgaria, Brazil, Canada, Czech Republic, France, Italy, The Netherlands, Russian Confede-

- ration, Spain and United Kingdom: A collection of fact sheets. ENTRIA-Arbeitsbericht. Im Erscheinen
- Köhnke D. (2017) Die unbestimmte Nutzungsdauer als besondere technische Herausforderung bei der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle. In: Köhnke D., Reichardt M. und Semper F. (Hrsg.) Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle: Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen. Springer Vieweg, 71–88
- Köhnke D., Reichardt M. und Budelmann H. (2017) Wie organisieren andere Länder eine langfristige Zwischenlagerung hoch radioaktiver Reststoffe? In: Müller M. C. M. (Hrsg.) *Loccumer Protokoll: Atommüll-Lager: Was soll wann wie wohin – und wer macht was?* (Konferenzband). Rehburg-Loccum, 101–110
- Köhnke D., Reichardt M. und Budelmann H. (2017) Wie organisieren andere Länder eine langfristige Zwischenlagerung hoch radioaktiver Reststoffe? *Loccumer Protokoll* 2017 (27)
- Köhnke D., Reichardt M. und Semper F. (Hrsg.) (2017) Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle: Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen. Springer
- Kreusch J. und Neumann W. (2017) Qualitativer Vergleich der radiologischen Risiken während der Betriebsphase von Entsorgungsoptionen. ENTRIA-Arbeitsbericht. In Vorbereitung
- Kuppler S. (2017) Effekte deliberativer Ereignisse in der Endlagerpolitik. Deutschland und die Schweiz im Vergleich von 2001 bis 2010. Springer Fachmedien Wiesbaden
- Léon Vargas R. P., Stahlmann J. und Mintzlaff V. (2017) Thermal impact in the geometrical settings in deep geological repositories for HLW with retrievability and monitoring. In: *16th International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM 2017)* (Konferenzband). American Nuclear Society, 664–671
- Lux K.-H., Wolters R. und Zhao J. (2017) Auf dem langen Weg zu einem Endlager für hochradioaktive, Wärme entwickelnde Abfälle. Ein neuer konzeptionell-konfigurativer Ansatz und ein neues Simulationswerkzeug zur Erarbeitung eines verbesserten Prozess- und Systemverständnisses für HAW-Entsorgungsanlagen – ohne und mit direktem längerfristigem Monitoring. Teil I: Endlagerforschung zwischen den Anforderungen nach technischer Sicherheit und sozialer Gerechtigkeit. *atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie* 62 (3), 185–198
- Lux K.-H., Wolters R. und Zhao J. (2017) Auf dem langen Weg zu einem Endlager für hochradioaktive Wärme entwickelnde Abfälle – Ein neuer konzeptionell-konfigurativer Ansatz und ein neues Simulationswerkzeug zur Erarbeitung eines verbesserten Prozess- und Systemverständ-

- nisses für HAW-Entsorgungsanlagen – ohne und mit direktem längerfristigem Monitoring. Teil II: Der FTK-Simulator als neues Werkzeug zur Analyse fluiddynamischer Prozesse in einer HAW-Entsorgungsanlage. *atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie* 62 (4), 244–257
- Lux K.-H., Wolters R. und Zhao J. (2017) Auf dem langen Weg zu einem Endlager für hochradioaktive Wärme entwickelnde Abfälle – Ein neuer konzeptionell-konfigurativer Ansatz und ein neues Simulationswerkzeug zur Erarbeitung eines verbesserten Prozess- und Systemverständnisses für HAW-Entsorgungsanlagen – ohne und mit direktem längerfristigem Monitoring. Teil III: Ein neues konzeptionelles und konfiguratives Konzept zur Entsorgung hochradioaktiver Wärme entwickelnder Abfälle. *atw – Internationale Zeitschrift für Kernenergie* 62 (5), 317–326
- Lux K.-H. et al. (2017) ENTRIA-Arbeitsbericht 07: TH2M-basierte multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle – Ein Beitrag zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz im Hinblick auf die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen
- Mbah M. (2017) Partizipation und Deliberation als Schlüsselkonzepte im Konflikt um die Endlagerung radioaktiver Abfälle? Herausforderungen für die repräsentative Demokratie. Interner Bericht. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
- Neumann W. (2017) Sicherheit und Strahlenschutz bei der Genehmigungsverlängerung zur Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. In: Köhnke D., Reichardt M. und Semper F. (Hrsg.) Längerfristige Aufbewahrung hoch radioaktiver Reststoffe in Oberflächenanlagen – Diskussionsbeiträge zu den aktuellen Entwicklungen der deutschen Entsorgungsstrategie. In Vorbereitung
- Ott K. und Budelmann H. (2017) Oder vielleicht doch nicht unter die Erde – Überlegungen zur Rolle der Oberflächenlagerung in einer Entsorgungsstrategie. In: Köhnke D., Reichardt M. und Semper F. (Hrsg.) Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle: Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen. Springer Vieweg
- Pang B., Saurí Suárez H. und Becker F. (2017) Reference level of the occupational radiation exposure in a deep geological disposal facility for high-level nuclear waste: A Monte Carlo study. *Annal of Nuclear Energy* (110), 258–264
- Plischke E., Mara T. und Tarantola S. (2017) Advanced Sensitivity Methods using Random Balance Design. In Vorbereitung

- Pohlers J. (2017) Laien-Partizipation muss wissenschaftlich gewollt sein. *Umweltpsychologie*. In Vorbereitung
- Pönitz E., Walther C. und Hassel T. (2017) Calculation of Dose Rates at the Surface of Storage Containers for High-Level Radioactive Waste. In: International Radiation Protection Association (Hrsg.) *Proceedings of the 14th International Congress of the International Radiation Protection Association* (Konferenzband). Kapstadt, 1932–1938
- Pönitz E. und Walther C. (2017) Calculation of Dose Rates at the Surface of Storage Containers for High-level Radioactive Waste. *Radiation Protection Dosimetry* **177** (4), 361–372
- Reichardt M. (2017) Herausforderungen und Randbedingungen für das Zwischenlagerbauwerk als langfristig wirksame, vollwertige mechanische Barriere. In: Köhnke D., Reichardt M. und Semper F. (Hrsg.) *Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle: Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen*. Springer Vieweg, 89–113
- Reichardt M., Semper F. und Köhnke D. (2017) Zwischenlagerung hoch radioaktiver, Wärme entwickelnder Abfälle in Deutschland – ein Überblick. In: Köhnke D., Reichardt M. und Semper F. (Hrsg.) *Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle: Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen*. Springer Vieweg, 01–10
- Riemann M. (2017) Gerechtigkeit an der Oberfläche. In: Köhnke D., Reichardt M. und Semper F. (Hrsg.) *Sammelband: Längerfristige Aufbewahrung hoch radioaktiver Reststoffe in Oberflächenanlagen – Diskussionsbeiträge zu den aktuellen Entwicklungen der deutschen Entsorgungsstrategie*. Springer Vieweg, 159–171
- Saurí Suárez H. et al. (2017) Monte-Carlo based study on the influence of host rock on the radiation exposure in a deep geological disposal facility for high-level nuclear waste. *Annals of Nuclear Energy*. In Vorbereitung
- Saurí Suárez H. et al. (2017) Monte-Carlo based comparison of the personal dose for emplacement scenarios of spent nuclear fuel casks in generic deep geological repositories. *atw – International Journal for Nuclear Power* **62** (6), 384–390
- Semper F. (2017) Kommentierung zu §§4 Abs. 1 bis 3, 11, 12, 14 – 19, Vorbemerkung zu §§13–20. In: Smeddinck U. (Hrsg.) *StandAG. Standortauswahlgesetz. Kommentar*. Berliner Wissenschafts-Verlag
- Semper F. (2017) Aufbewahrungsgenehmigung für radioaktive Abfälle – Verlängerung versus Neugenehmigung. In: Köhnke D., Reichardt M. und Semper F. (Hrsg.) *Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle – Randbedingungen und Lösungsansätze zu den aktuellen Herausforderungen*. Springer Vieweg, 141–157

- Smeddinck U. (Hrsg.) (2017) StandAG. Standortauswahlgesetz. Kommentar. Berliner Wissenschafts-Verlag
- Smeddinck U. (2017) Kommentierung zu §§1, 2, 5, 6, 8, 9, 10. In: Smeddinck U. (Hrsg.) StandAG. Standortauswahlgesetz. Kommentar. Berliner Wissenschafts-Verlag
- Smeddinck U. (2017) Die Fortentwicklung des StandAG – Gesetzgebungsgeschichte, Beispiele, Reflektionen. *EurUP-Zeitschrift für Europäisches Umwelt- und Planungsrecht* **2017** (3), 195–295
- Smeddinck U. und Semper F. (2017) Long-term Governance zur Begleitung eines Endlagers aus rechtswissenschaftlicher Sicht. In: Hocke P. et al. (Hrsg.) Technical Monitoring and Long-Term Governance. edition sigma. In Vorbereitung
- Tawussi F. (2017) Einfluss der Speziation auf die Radionuklidaufnahme von Pflanzen. Dissertation. Institut für Radioökologie und Strahlenschutz
- Tawussi F., Walther C. und Gupta D. K. (2017) Does low uranium concentration generate phytotoxic symptoms in *Pisum sativum* L. in nutrient medium? *Environmental Science and Pollution Research* **24** (28), 22741–22751
- Willmann S. (2017) Kommentierung zu §§3, 4 Abs. 4 und 5, 7, 13, 30, Art. 3, 6. In: Smeddinck U. (Hrsg.) StandAG. Standortauswahlgesetz. Kommentar. Berliner Wissenschafts-Verlag
- Zhao J. (2017) Multiphysikalische Prozess- und Systemanalyse für geologische Tiefenlager im Tonsteingebirge in der Nachverschlussphase. Dissertation. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik

2018

- Borgonovo E., Morris M. D. und Plischke E. (2018) Functional ANOVA with Multiple Distributions: Implications for the Sensitivity Analysis of Computer Experiments. *SIAM / ASA Journal on Uncertainty Quantification* **6** (1), 397–427
- Budelmann H. et al. (2018) Rhetorik in diskursiver Absicht: Plädoyers und Gegenreden. Argumentationsanalyse. ENTRIA-Arbeitsbericht. In Vorbereitung
- Hocke P. und Kuppler S. (2018) Erwartungen an Modernes Regieren im deutschen Endlagerkonflikt. Ergebnisse aus ENTRIA-Fokusgruppen. *Technisches Monitoring und Long-term Governance*. Im Erscheinen
- Köhnke D. et al. (2018) Länderstudie – Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle in Frankreich. ENTRIA-Arbeitsbericht. In Vorbereitung

- Kuppler S. und Hocke P. (2018) The role of long-term planning in nuclear waste governance. *Journal of Risk Research*. Im Erscheinen
- Lux K.-H. et al. (2018) Multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Möglichkeit eines direkten Monitorings – Ein Beitrag zur Verbesserung des geomechanischen und fluiddynamischen Systemverständnisses bei TH2M-gekoppelten Prozessen. Papierflieger Verlag
- Lux K.-H. et al. (2018) Fluidynamic processes within a closed repository in rock salt mass without or with additional components for long-term monitoring. In: *Proceedings zur SaltMech-IX-Konferenz* (Konferenzband). Hannover. In Vorbereitung
- Mbah M. (2018) Participation in Radioactive Waste Management. Challenges for representative democracies. In Vorbereitung
- Ott K. und Riemann M. (2018) „Volenti non fiat iniuriam“ – Freiwilligkeit und Bereitschaft bei der Übernahme von Standortverantwortung. In: Ott K. und Smeddinck U. (Hrsg.) Umwelt, Gerechtigkeit, Freiwilligkeit – insbesondere bei der Realisierung eines Endlagers. Berliner Wissenschaftsverlag
- Stahlmann J. et al. (2018) ENTRIA-Arbeitsbericht 08: Normalszenarien und Monitoringkonzepte für Tiefenlager mit der Option Rückholung. ENTRIA-Arbeitsbericht 08. In Vorbereitung
- Weisensee C. (2018) Ein Belastungsausgleich für das „Atomdreieck“ – Das Gesetz über die „Stiftung Zukunftsfonds Asse“. In: Ott K. und Smeddinck U. (Hrsg.) Umwelt, Gerechtigkeit, Freiwilligkeit – insbesondere bei der Realisierung eines Endlagers. Berliner Wissenschafts-Verlag

2019

- Smeddinck U. (2019) Feigenblatt oder Wachhund mit Konfliktradar? – Das Nationale Begleitgremium nach §8 Standortauswahlgesetz. *Infrastrukturrecht – Festschrift für Wilfried Erbguth*

8.3 Interdisziplinäre Fachbeiträge

2013

- Appel D. (2013) Entsorgungsoptionen. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 24.04.2013

- Brunnengräber A. (2013) Partizipation bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013. Eingeladen
- Brunnengräber A. und Hocke P. (2013) Nukleare Entsorgung und Technikfolgenabschätzung. Impulsvortrag. 3-Länder-Tagung der deutschsprachigen politologischen Gesellschaften, Heidelberg, 27.09.2013. Eingeladen
- Chaudry S. und Tzschentke C. (2013) Vorstellung des Transversalprojekts 1. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Eckhardt A. (2013) Risiko und Aufsichtsbehörden. Beitrag zum Workshop „Risiko – wissenschaftliche Herausforderung und Politikum“. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Eckhardt A. (2013) Discussant Sitzung „Konfliktpotentiale der Rückholoption für radioaktive Abfälle aus geotechnischer Sicht“. Discussant Beitrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Eckhardt A. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 4.3. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- Eckhardt A. (2013) Impulsvortrag Kick-Off-Meeting. Impulsvortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 24.04.2013
- Eckhardt A. (2013) Vorstellung Transversalprojekt 4. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- Ghofrani J. und Plischke E. (2013) Vorstellung der Arbeitspakete 4.1 und 5.3. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Hocke P. (2013) Zum Risikobegriff interdisziplinärer Forschung. Gehaltvolle Unterscheidungen des Sachverständigenrates für Umweltfragen (1999). Impulsvortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Röhlig K.-J. et al. (2013) Vorstellung IELF/IFAD der TU Clausthal. Impulsvortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 24.04.2013
- Smeddinck U. (2013) Das Standortauswahlgesetz – ein Überblick. Vortrag. 1. ENTRIA Bearbeitertreffen, Braunschweig, 13.09.2013

2014

- Chaudry S. et al. (2014) Interdisziplinäre Zusammenarbeit. Vortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 13.11.2014
- Eckhardt A. (2014) Storage of high-level waste – Controversies about risk. Vortrag. 19th REFORM Group Meeting, Salzburg, Österreich, 02.09.2014. Eingeladen
- Eckhardt A. (2014) Risikolandschaft. Vortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 12.11.2014

- Eckhardt A. (2014) Risikolandschaft. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4 und Vertikalprojekt, Hannover, 29.07.2014
- Eckhardt A. (2014) Risikolandschaft. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4 und Risiko-Workshop, Zürich, 09.07.2014
- Eckhardt A. (2014) Vorstellung Transversalprojekt 4. Vortrag. 1. Beiratstreffen, Hannover, 29.04.2014
- Eckhardt A. und Marti M. (2014) Organisation und Durchführung des Transversalprojekt 4 Treffens „Interdisziplinäre Risikoforschung“ und Risiko-Workshops in Zürich. Organisation. Treffen Transversalprojekt 4 und Risiko-Workshop, Zürich, 09.-10.07.2014
- Metz V. (2014) Vorstellung des interdisziplinären Projekts ENTRIA. Vortrag. 88. Sitzung des Arbeitskreises HAW-Produkte, Karlsruhe, 01.04.2014
- Neumann W. (2014) Aktueller Stand Risikokarte. Vortrag. 3. ENTRIA Bearbeitertreffen, Kiel, 17.09.2014
- Ott K. et al. (2014) What is „good governance“ for HLW-storage? Podiumsdiskussion. 19th REFORM Group Meeting, Salzburg, Österreich, 02.09.2014. Eingeladen
- Smeddinck U. (2014) Grundfragen des Standortauswahlgesetzes – aus interdisziplinärer und rechtswissenschaftlicher Sicht. Vortrag. Fachgespräch „Rechtliche Fragestellung rund um den Atomausstieg“, Berlin, 29.01.2014
- Smeddinck U. (2014) Die neue Suche nach einem Endlager für Atommüll – aus rechtswissenschaftlicher Sicht. Vortrag. UPPW-Vortrag Nr. 25. Die neue Suche nach einem Endlager für Atommüll, Halle, 24.06.2014
- Walther C. et al. (2014) Vorstellung des interdisziplinären Projekts ENTRIA. Vortrag. Zwischenlager – Dauerlager – Endlager: Wo bleiben wir mit unseren radioaktiven Abfällen? Symposium des Fachverbandes Strahlenschutz, Mainz, 24.09.2014. Eingeladen
- Walther C. et al. (2014) ENTRIA: interdisciplinary views on disposal options for heat generating waste. Vortrag. NUSAFE Kick-Off, Jülich, 08.10.2014. Eingeladen

2015

- Brunnengräber A. (2015) Nuclear Waste Governance – zur Entsorgung von nuklearem Abfall in Deutschland und weltweit. Vortrag. The German Energy Transition and the Nuclear Phase-Out, Berlin, 14.10.2015. Eingeladen

- Di Nucci M. R. (2015) The Challenge of Nuclear Waste Disposal in the EU. A Comparative Perspective on Participation and Acceptance in Siting Procedures. Vortrag. Helmholtz Gesellschaft: „Energy Transitions around the World“, Berlin, 04.03.2015. Eingeladen
- Hassel T. (2015) ENCON Konzeptvorstellung – Werkstoffe für den Tragkorb, Innen- und Außenbehälter. Vortrag. ENTRIA Behälter-Workshop, Garbsen, 06.10.2015
- Hocke P. (2015) Evaluationskriterien für das Verbundvorhaben. Impulsvortrag. ENTRIA-Arbeitspaket-Leiter-Treffen, Clausthal-Zellerfeld, 02.03.2015
- Hocke P. (2015) Interdisziplinäre Perspektive auf das Entstehen, Festsetzen und Verändern von Grenzwerten. Impulsvortrag. 2. Beiratstreffen, Berlin, 11.03.2015
- Jakob H. (2015) Rückbau von Kernkraftwerken – Vortrag zur interdisziplinären Weiterbildung. Vortrag. 4. ENTRIA Bearbeitertreffen, Berlin, 16.04.2015
- Jakob H. (2015) ENCON Konzeptvorstellung – Motivation und Vorgehen beim Behälterworkshop. Vortrag. ENTRIA Behälter-Workshop, Garbsen, 06.10.2015
- König C. (2015) Heterogenität von Grenzwertkonzepten – Strukturen, Konzepte. Vortrag. ENTRIA-Werkstattgespräch „Grenzwertbildung im Strahlenschutz“, Braunschweig, 27.01.2015. Eingeladen
- Mez L. (2015) The Politics of Nuclear Waste Disposal in Germany. Vortrag. Helmholtz Gesellschaft: „Energy Transitions around the World“, Berlin, 05.03.2015. Eingeladen
- Ott K. (2015) Bewertungsgrundlagen aus wissenschaftstheoretischer und normativer Sicht: Der Schritt zu Kriterien. Impulsvortrag. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Pang B. et al. (2015) Individual dosimetry in a final disposal system for nuclear waste. Poster. INE-ITU Research Fellows Day, Karlsruhe, 13.08.2015
- Röhlig K.-J. (2015) Interdisciplinary Perspectives on Dose Limits in Radioactive Waste Management. Vortrag. RICOMET 2015, Brdo Castle, Slovenia, 17.06.2015
- Röhlig K.-J. (2015) Plädoyer für Endlagerung ohne Vorkehrung zur Rückholbarkeit. Vortrag. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Smeddinck U. (2015) Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Grenzwertfestlegung – eine Perspektive für die Strahlenschutzverordnung? Vortrag. ENTRIA-Werkstattgespräch „Grenzwertbildung im Strahlenschutz“, Braunschweig, 27.01.2015

2016

- Brunnengräber A. (2016) Nukleare Entsorgung aus Multi Level Governance-Perspektive. International vergleichende Analyse von Endlagerungs-Governance im Mehrebenen-System unter besonderer Berücksichtigung von Akteuren, Politikinstrumenten und Institutionen. Vortrag. 5. ENTRIA Projekttreffen, Berlin, 16.11.2016
- Chaudry S. (2016) Chancen und Herausforderungen inter- und transdisziplinärer Forschung. Impulsvortrag. Workshop Innovative Hochschule, Goslar, 05.12.2016. Eingeladen
- Chaudry S. (2016) Stand der Arbeiten zur Projektsynthese und der Entwicklung von Bewertungsgrundlagen. Vortrag. ENTRIA Arbeitspaket-Leiter-Treffen, Garbsen, 23.02.2016
- Chaudry S. (2016) Arbeitsstand Projektsynthese/Abschlussbericht: Vorstellung des Gliederungsentwurfs. Vortrag. ENTRIA Arbeitspaket-Leiter-Treffen, Braunschweig, 06.09.2016
- Chaudry S. (2016) Arbeitsstand Projektsynthese/Abschlussbericht: Vorstellung der detaillierten Gliederung. Vortrag. 5. ENTRIA Projekttreffen, Berlin, 18.11.2016
- Chaudry S. (2016) Arbeitsstand Projektsynthese/Abschlussbericht und Bewertungsgrundlagen. Vortrag. ENTRIA Arbeitspaket-Leiter-Treffen, Garbsen, 24.02.2016
- Chaudry S., Röhlig K.-J. und Plischke E. (2016) Gruppenarbeit zur Entwicklung von Bewertungsgrundlagen. Gruppenarbeit. 5. ENTRIA Projekttreffen, Berlin, 17.11.2016
- Chaudry S. und Riemann M. Warum wofür plädieren? Hypothetische Fürsprache und differenzierter Optionenvergleich. Vortrag. 3. Beiratstreffen, Barsinghausen
- Di Nucci M. R. und Brunnengräber A. (2016) In wessen Backyard? Das verzwickte Problem der Entsorgung nuklearer Reststoffe. Vortrag. 3-Länder-Tagung der deutschsprachigen politologischen Gesellschaften, Heidelberg, 29.09.-01.10.2016. Eingeladen
- Eckhardt A. (2016) Szenarien. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4, Delémont, Schweiz, 07.04.2016
- Eckhardt A. (2016) Monitoring in the Swiss Concept of Deep Geological Repositories. Vortrag. Workshop „Technical Monitoring and Long-term Governance“, Karlsruhe, 18.10.2016. Eingeladen
- Eckhardt A. (2016) Organisation und Durchführung des Transversalprojekt 4 Treffens „Interdisziplinäre Risikoforschung“ in Delémont/St. Ursanne. Organisation. Treffen Transversalprojekt 4, Delémont, Schweiz, 07.-08.04.2016

- Grunwald A. (2016) Stakeholder and citizen participation for improving acceptance? Against oversized expectations. Vortrag. Workshop „Energy in Exchange“, Dresden, 07.04.2016
- Grunwald A. (2016) Results and Recommendations on Monitoring given by the Endlagerkommission. Vortrag. Workshop „Technical Monitoring and Long-term Governance“, Karlsruhe, 19.10.2016
- Hassel T. (2016) Erstellung von generischen Behältermodellen. Vortrag. 3. Beiratstreffen, Barsinghausen, 10.03.2016
- Hassel T. (2016) The Importance of Retrievability in the Context of Long-term Monitoring. Vortrag. Workshop „Technical Monitoring and Long-term Governance“, Karlsruhe, 19.10.2016
- Hassel T. (2016) Die Rolle des Behälterkonzeptes bei der Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen für die Optionenanalyse im ENTRIA Verbund. Vortrag. Fachtagung: Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 02.11.2016
- Hocke P. (2016) Technikfolgenabschätzung und Monitoring. Zum Verschränken technischer und sozialer Erwartungen. Vortrag. Fachtagung: Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 02.11.2016
- Hocke P. und Kalmbach K. (2016) Fragen des Wissensmanagements und der Wissenskommunikation. Impulsvortrag. 5. ENTRIA Bearbeitertreffen, Karlsruhe, 14.03.2016
- Hocke P. und Mbah M. (2016) Endlagerung hochradioaktiver Abfälle – Erbe des Atomenergiezeitalters. Vortrag. Tagung „10 Jahre AK Geographische Energieforschung der Deutschen Gesellschaft für Geographie“, Karlsruhe, 08.-09.04.2016
- Köhnke D. und Riemann M. (2016) Approach to Surface Storage of High Level Radioactive Waste. Vortrag. The Forum on Philosophy, Engineering & Technology (fPET), Nürnberg, 19.05.2016
- Kreusch J. und Neumann W. (2016) Überlegungen zum Umgang mit Szenarien bei der Identifizierung von Robustheitsdefiziten von Sicherheitsfunktionen. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4, Delémont, Schweiz, 08.04.2016
- Kuppler S., Hocke P. und Bechthold E. (2016) Organisation und Durchführung des Internationalen ENTRIA-Workshops „Technical Monitoring and Long-term Governance“ am ITAS. Organisation. Workshop „Technical Monitoring and Long-term Governance“, Karlsruhe, 18.-19.10.2016
- Kuppler S., Mbah M. und Wulf N. (2016) Vorbereitung, Organisation und Durchführung des ENTRIA-Bearbeitertreffens am ITAS. Organisation. 5. ENTRIA Bearbeitertreffen, Karlsruhe, 14.-17.03.2016

- Kuppler S. und Hocke P. (2016) Monitoring in the Context of Long-term Governance. Introduction. Vortrag. Workshop „Technical Monitoring and Long-term Governance“, Karlsruhe, 18.10.2016
- Neumann W. (2016) Interdisziplinäre Risikoforschung. Vortrag. 5. ENT-RIA Projekttreffen, Berlin, 16.11.2016
- Pang B. et al. (2016) Modeling of individual dosimetry in facilities for heat-generating waste: Spent nuclear fuel emplacement in a rock salt repository. Poster. 2. DAEF Tagung „Key Topics in Deep Geological Disposal“, Köln, 27.09.2016
- Riemann M. und Smeddinck U. (2016) Freiwilligkeit bei der Realisierung eines Endlagers für Atommüll – eine ethisch-rechtswissenschaftliche Betrachtung. Vortrag. 3. Beiratstreffen, Barsinghausen, 11.03.2016
- Röhlig K.-J. (2016) The Project ENTRIA (Options for the Disposal of Radioactive Waste: Interdisciplinary Analyses and Development of Valuation Bases): Overview and Selected Interim Results. Vortrag. 47. Jahrestagung Kerntechnik, Hamburg, 10.05.2016. Eingeladen
- Röhlig K.-J. (2016) Die interdisziplinäre Forschungsplattform ENTRIA – Überblick und ausgewählte Zwischenergebnisse. Vortrag. Endlager-Symposium 2016, München, 04.02.2016. Eingeladen
- Röhlig K.-J. (2016) ENTRIA: Struktur und Inhalte des Forschungsverbundes. Vortrag. Fachtagung: Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.11.2016
- Röhlig K.-J., Li X. und Plischke E. (2016) Modelle zur Radionuklidmigration – ein Baustein zur Risikobewertung von Tiefenlagern. Vortrag. Fachtagung: Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 02.11.2016. Eingeladen
- Semper F. (2016) Buchvorstellung Sammelband Längerfristige Aufbewahrung hoch radioaktiver Reststoffe in Oberflächenanlagen – Diskussionsbeiträge zu den aktuellen Entwicklungen der deutschen Entsorgungsstrategie. Buchpräsentation. 3. Beiratstreffen, Barsinghausen, 10.03.2016
- Semper F. und Smeddinck U. (2016) Freiwilligkeit bei der Realisierung eines Endlagers für Atommüll – eine ethisch-rechtswissenschaftliche Betrachtung. Vortrag. Synthesetreffen, Hannover, 29.09.2016
- Smeddinck U. (2016) „Freiwilligkeit“ bei der Realisierung eines Endlagers für Atommüll – aus rechtswissenschaftlicher Sicht. Vortrag. ENT-RIA-Werkstattgespräch „Umwelt, Gerechtigkeit, Freiwilligkeit“, Braunschweig, 28.01.2016
- Smeddinck U. (2016) Bedeutung der Interdisziplinarität im Forschungsverbund – (m)eine Geschichte. Vortrag. Fachtagung: Technische Aspek-

- te von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.11.2016. Eingeladen
- Tawussi F. (2016) Einfluss der Speziation auf die Radionuklidaufnahme von Pflanzen im Hinblick auf verschiedene Szenarien. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4, Delémont, Schweiz, 07.04.2016
- Walther C. (2016) Entsorgungsoptionen für HAW. Die Schaffung interdisziplinärer Bewertungsgrundlagen in ENTRIA. Vortrag. Jahrestagung des Fachverbands für Strahlenschutz 2016, Heringsdorf, 28.09.2016. Eingeladen
- Walther C. (2016) Vorstellung der Arbeitspakete 4.2, 4.6 und 2.3. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4, Delémont, Schweiz, 07.04.2016
- Walther C. et al. (2016) Vorstellung Arbeitspakete 4.2, 4.6, 2.3 und 2.3 (Status und Gesamteinordnung). Vortrag. 5. ENTRIA Projekttreffen, Berlin, 18.11.2016
- Wulf N. und Grunwald A. (2016) Responsibility across generations: The German approach to nuclear waste disposal. Vortrag. 5th Japanese-German University President's Network Conference, Karlsruhe, 30.09.2016. Eingeladen

2017

- Bozau E. et al. (2017) Estimation of cesium release and transport from deep radioactive waste disposals. Poster. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 26.-30.09.2017. Eingeladen. Geplant
- Chaudry S. (2017) Synthesis of results within the interdisciplinary research project ENTRIA. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 27.09.2017
- Chaudry S. und Riemann M. (2017) Warum wofür plädieren? Hypothetische Fürsprache und differenzierter Optionenvergleich. Vortrag. 4. Beiratstreffen, Karlsruhe, 13.03.2017
- König C. (2017) Long term safety assessment -results from expert interviews. Vortrag. 4th International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity (ICRER), Berlin, 03.09.2017
- König C. (2017) Role and Implementation of Dose Modelling in Final Disposal of Radioactive Waste. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 27.09.2017
- Semper F. (2017) Responsibility towards Future Agents in German Nuclear Law. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 27.09.2017

- Walther C. (2017) Interdisciplinary Perspectives on Disposal of High-Level Radioactive Waste – The German Case. Vortrag. International High-Level Radioactive Waste Management (IHLRWM 2017), Charlotte, USA, 12.04.2017
- Walther C. (2017) Interdisciplinary Education and Training by ENTRIA. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 27.09.2017. Eingeladen
- Walther C. (2017) ENTRIA: Ein interdisziplinäres Verbundprojekt zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Poster. Jahrestagung, Fachverband für Strahlenschutz 2017, Hannover, 10.09.2017
- Walther C., Brunnengräber A. und Hocke P. (2017) Grenzwerte zwischen gesellschaftlicher Kritik und fachlicher Expertise. Vortrag. 4. Beiratstreffen, Karlsruhe, 13.03.2017
- Walther C. et al. (2017) Radioecology and the Disposal of High Level Radioactive Waste – the Interdisciplinary Research Project ENTRIA. Vortrag. 4th International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity (ICRER), Berlin, 04.09.2017. Eingeladen

2018

- Smeddinck U. (2018) Die Öffentlichkeitsbeteiligung im Standortauswahlverfahren – experimentell, resilient und partizipationsfähig? Vortrag. Bürgerpartizipation – neu gedacht, Halle, 19.01.2018. Eingeladen

8.4 Disziplinäre Fachbeiträge

2013

- Becker F. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 4.5. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- Becker F. und Pang B. (2013) ENTRIA und Individuelle Dosimetrie für Beschäftigte in Entsorgungsanlagen. Vortrag. 79. Sitzung des Arbeitskreises Dosimetrie, Essenbach, 05.11.2013
- Becker F. und Pang B. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 4.5. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Brunnengräber A. (2013) International Energy Politics in Transformation: Civil Society as Bearer of Hope? Vortrag. Third China-EU Social Ecological Forum, Taiyuan, China, 25.09.2013. Eingeladen

- Brunnengräber A. (2013) Beteiligungsprozesse bei der Endlagersuche. Vortrag. Boom informeller Beteiligungsprozesse – Erfolg oder Sackgasse?, Berlin, 01.03.2013. Eingeladen
- Budelmann H. (2013) Impulsvortrag Vertikalprojekt 7. Impulsvortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- Budelmann H., Köhnke D. und Reichardt M. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 7.1 „Bautechnische Konzepte zur obertägigen Lagerung radioaktiven Abfalls“. Impulsvortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 21.11.2013
- Chaudry S., Plischke E. und Riemann M. (2013) Bericht zum Workshop bei der Ferienakademie des Cusanuswerks in Papenburg. Vortrag. 1. ENTRIA Bearbeitertreffen, Braunschweig, 12.09.2013
- Di Nucci M. R. (2013) Nuclear Waste Governance in Italy. Vortrag. 18th REFORM Group Meeting, Salzburg, Österreich, 26.08.2013. Eingeladen
- Di Nucci M. R. (2013) Nuclear Waste Management in Germany: Political and Societal Challenges. Vortrag. Comparing Japanese and German Approaches to Denuclearization and Energy System Transformation, Berlin, 12.03.2013
- Di Nucci M. R. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 2.2. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Di Nucci M. R. und Brunnengräber A. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 2.2. Impulsvortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- Drögemüller C. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 2.4 „Gegenwartsanalyse der Bewertung von Entsorgungsoptionen und -strategien radioaktiver Abfälle aus Sicht kommunaler Entscheidungsträger und lokaler Bevölkerung“. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- Drögemüller C. Vorstellung Arbeitspaket 2.4 „Gegenwartsanalyse der Bewertung von Entsorgungsoptionen und -strategien radioaktiver Abfälle aus Sicht kommunaler Entscheidungsträger und lokaler Bevölkerung“. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe
- Fellhauer D., Metz V. und Altmaier M. (2013) Lagerkonzepte und daraus resultierende geochemische Randbedingungen – Auswirkungen auf Radionuklidquellterme. Impulsvortrag. 1. ENTRIA Bearbeitertreffen, Braunschweig, 13.09.2013
- Fellhauer D. et al. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 4.4. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Geckeis H. (2013) Vorstellung des KIT-INE und des Beitrags zu ENTRIA. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 24.04.2013
- Häfner D. und Kuppler S. (2013) Internationaler Vergleich der diskursiven Auswahl der Standort- und Lagerkonzepte. Impulsvortrag. 1. ENTRIA Bearbeitertreffen, Braunschweig, 13.09.2013

- Hocke P. Vorstellung Arbeitspaket 2.1 „Governance zwischen Wissenschaft und öffentlichem Protest“. Vortrag. Fachgespräch ITAS/INE, Karlsruhe
- Hocke P. (2013) Governance der nuklearen Entsorgung und die zentrale Bedeutung sozialer Prozesse. Transversalprojekt 2. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Hocke P. und Grunwald A. (2013) Vorstellung Transversalprojekt 2. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- Hocke P. und Grunwald A. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 2.1 „Governance zwischen Wissenschaft und öffentlichem Protest“. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- Hocke P. und Kuppler S. (2013) German and Swiss nuclear waste policy. Attempts of new participative governance under tricky conditions. Vortrag. 18th REFORM Group Meeting, Salzburg, Österreich, 26.08.2013. Eingeladen
- Hocke P. und Röhlig K.-J. (2013) Kommunikation der Ergebnisse von Sicherheitsbewertungen. Discussantsitzung. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Isidoro Losada A. M. (2013) Nuclear Waste Governance in Spain. Vortrag. 18th REFORM Group Meeting, Salzburg, Österreich, 26.08.2013. Eingeladen
- Jakob H. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 6.5. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 21.11.2013
- Kallenbach-Herbert B. und Minhans A. (2013) Einführung Vertikalprojekt 5. Option Endlagerung ohne Vorkehrung zur Rückholbarkeit. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 21.11.2013
- Köhler A. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 6.6. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Köhnke D. und Budelmann H. (2013) Vorstellung Vertikalprojekt 7. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- König C. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 2.3. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- Kuppler S. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 2.1 „Governance zwischen Wissenschaft und öffentlichem Protest“. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Léon Vargas R. P. und Köhler A. (2013) Grundlagen der Rückholbarkeit. Wichtige Definitionen und Behälterkonzepte. Vortrag. 1. ENTRIA Bearbeiter-treffen, Braunschweig, 13.09.2013
- Li X., Plischke E. und Röhlig K.-J. (2013) RESUS: A new software platform for Repository Simulation, Uncertainty propagation an Sensitivity ana-

- lysis. Vortrag. The 3rd International Workshop on Model Based Safety Assessment, Versailles, Frankreich, 27.03.2013. Eingeladen
- Lux K.-H. (2013) Vorstellung Arbeitspakete 5.1 und 5.2. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- Marti M. (2013) Endlagerung von radioaktiven Abfällen – Risiken aus gesellschaftlicher Perspektive. Impulsvortrag. 1. ENTRIA Bearbeitertreffen, Braunschweig, 13.09.2013
- Mengel K. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 5.3. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- Metz V. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 4.4 „Radionuklidquellterme für verschiedene Entsorgungsoptionen“. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- Mez L. (2013) Status and Perspectives of „Energiewende“ and Germany’s Nuclear Phase-Out Policy. Vortrag. Séminaire NEEDS, Paris, Frankreich, 19.11.2013. Eingeladen
- Mez L. (2013) Germany’s Nuclear Phase Out Policy. Vortrag. Comparing Japanese and German Approaches to Denuclearization and Energy System Transformation, Berlin, 12.02.2013. Eingeladen
- Mez L. et al. (2013) Entsorgung und Governance. Impulsvortrag. 1. Treffen Transversalprojekt 2, Karlsruhe, 27.09.2013
- Mintzlaff V. (2013) Eine kleine Wirtsgesteinskunde: Eigenschaften und Verbreitung. Vortrag. 1. ENTRIA Bearbeitertreffen, Braunschweig, 13.09.2013
- Mintzlaff V. und Léon Vargas R. P. (2013) Rückholbarkeit – Zusammenfassung der Literaturrecherche als Diskussionsgrundlage für die Prototypentwicklung. Vortrag. Treffen Vertikalprojekt 6, Braunschweig, 24.07.2013
- Ott K. und Riemann M. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 3.1 „Entscheider und Betroffene in der Risikoethik. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Plischke E., Marti M. und Smeddinck U. (2013) Technisches Risiko. Vortrag. 1. ENTRIA Bearbeitertreffen, Braunschweig, 13.09.2013
- Riemann M. (2013) Taking out the Trash – Radioactive Waste, Technology Assessment and Democracy. Vortrag. 23rd World Congress of Philosophy, Athen, Griechenland, 06.08.2013. Eingeladen
- Riemann M. (2013) Atom Müll und Demokratie – eine liaison dangereuse. Vortrag. Forschungskolloquium Wirtschafts – und Umweltethik, Kiel, 20.11.2013
- Röhlig K.-J. (2013) Radioactive Waste Disposal: Technical „Tour de Force“. Vortrag. 18th REFORM Group Meeting, Salzburg, Österreich, 26.08.2013. Eingeladen

- Röhlig K.-J. (2013) Vorstellung Transversalprojekt 1. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- Röhlig K.-J. (2013) Vorstellung Arbeitspaket 4.1. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.04.2013
- Röhlig K.-J. (2013) Begriffsbestimmung. Einschlusswirksamer Gebirgsbereich. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Schreurs M. A. (2013) Challenges and Approaches to Public Participation. Vortrag. Nuclear Human Resource Development Project: 3rd International Seminar Series on Environmental Radioactivity – a Scientific Basis for Environmental Remediation in Fukushima, Sapporo, Japan, 10.11.2013. Eingeladen
- Schreurs M. A. (2013) Nuclear Waste Governance: The Comparative ENTRIA Approach. Vortrag. 18th REFORM Group Meeting, Salzburg, Österreich, 26.08.2013. Eingeladen
- Smeddinck U. (2013) Der Risiko-Begriff im Umwelt- und Atomrecht. Impulsvortrag. 1. ENTRIA Bearbeitertreffen, Braunschweig, 13.09.2013
- Smeddinck U. (2013) Abfall und Reststoff: Entsorgung versus wartungsfreie Tiefenlagerung? – Zur Semantik einschlägiger Begriffe. Impulsvortrag. 1. Treffen Transversalprojekt 2, Karlsruhe, 27.09.2013
- Stahlmann J. (2013) Monitoring of Sealing Dams – Experiences from Test Set-Up at the Repository ERM. Vortrag. International Conference and Workshop „Monitoring in Geological Disposal of Radioactive Waste: Objectives, Strategies, Technologies and Public Involvement, Luxembourg, Luxemburg, 20.03.2013
- Stahlmann J. (2013) Proponent der Discussant Sitzung „Konfliktpotentiale der Rückholoption für radioaktive Abfälle aus geotechnischer Sicht“. Discussant Beitrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 22.11.2013
- Tawussi F. (2013) Einführung in das Arbeitspaket 4.6 „Einfluss der Radionuklidspeziation auf Transferfaktoren“. Vortrag. ENTRIA-Kick-Off-Meeting, Goslar, 25.03.2013
- Wolters R. (2013) Vorstellung Arbeitspakete 5.1 und 5.2. Vortrag. 2. ENTRIA Projekttreffen, Karlsruhe, 21.11.2013

2014

- Becker F. (2014) Personendosimetrie: Dosisbegriffe und Dosisgrößen – Dosisgrenzwerte – Personendosismessung. Vortrag. 2. ENTRIA Bearbeitertreffen, Goslar, 20.03.2014

- Becker F. (2014) Entwicklung von Verfahren für individuelle Dosimetrie für Beschäftigte in Entsorgungsanlagen (AP 4.5). Poster. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 13.11.2014
- Becker F. et al. (2014) Risikolandschaft beim Arbeitspaket 4.5. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4 und Risiko-Workshop, Zürich, 10.07.2014
- Borkel C. et al. (2014) Lagerkonzepte und daraus resultierende geochemische Randbedingungen – Auswirkungen auf Radionuklidquellterme. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4 und Risiko-Workshop, Zürich, 10.07.2014
- Bozau E. (2014) Hydrogeochemische Grundlagen für Geothermie- und Endlagerforschung. Vortrag. 2. ENTRIA Bearbeitertreffen, Goslar, 19.04.2014
- Brunnengräber A. (2014) Bewegung pro Endlager. Vortrag. Technik und Protest. Zwischen Innovation, Akzeptanzmanagement und Kontrolle, Berlin, 23.09.2014. Eingeladen
- Brunnengräber A. und Häfner D. (2014) Herrschaftsverhältnisse in der Mehreben-Governance der nuklearen Entsorgung. Vortrag. Globaler Wandel und Macht, Berlin, 10.02.2014. Eingeladen
- Budelmann H. (2014) Incorporation of Concrete Rehabilitation Measures into Life-Cycle Maintenance. Vortrag. International Conference on Sustainable Development of Critical Infrastructure, Shanghai, China, 18.05.2014. Eingeladen
- Budelmann H. (2014) Vorstellung Vertikalprojekt 7. Poster. 1. Beiratstreffen, Hannover, 30.04.2014
- Budelmann H. (2014) Vorstellung Vertikalprojekt 7 „Oberflächenlagerung, Referenzmodelle“. Vortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 13.11.2014
- Budelmann H. (2014) Sicherheit, Zuverlässigkeit, Risiko – Begriffsinterpretationen aus bautechnischer Sicht. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4 und Vertikalprojekt, Hannover, 29.07.2014
- Budelmann H. (2014) Nachweiskonzepte im Bauwesen, heute übliche Nachweisführung für Bauwerke, Interpretationen. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4 und Vertikalprojekt, Hannover, 29.07.2014
- Budelmann H. (2014) Annahmen zur Oberflächenlagerung. Impulsvortrag. Treffen Transversalprojekt 4 und Vertikalprojekt, Hannover, 29.07.2014
- Budelmann H. (2014) Vorstellung Vertikalprojekt 7. Vortrag. 1. Beiratstreffen, Hannover, 29.04.2014
- Chaudry S. (2014) Zeit, Zeiträume und ihre Rezeption im Themenkomplex der Entsorgung radioaktiver Reststoffe unter besonderer Berücksichtigung der Rückholungsproblematik. Vortrag. 2. ENTRIA Bearbeitertreffen, Goslar, 19.03.2014

- Chaudry S. und Mintzlaß V. (2014) Zeitdimensionen. Impulsvortrag. 3. ENTRIA Bearbeitertreffen, Kiel, 17.09.2014
- Di Nucci M. R. (2014) Same, Same but Different – A Comparative Perspective on Participation and Acceptance in Siting Procedures for HLW repositories in France, Sweden and Finland. Vortrag. 1. DAEF Tagung „Key Topics in Deep Geological Disposal“, Köln, 25.09.2014. Eingeladen
- Drögemüller C. (2014) Die Rückholungsdiskussion: Wahrnehmung in der Öffentlichkeit. Impulsvortrag. 2. ENTRIA Bearbeitertreffen, Goslar, 20.03.2014
- Drögemüller C. (2014) Vorstellung Arbeitspaket 2.4 „Gegenwartsanalyse der Bewertung von Entsorgungsoptionen und -strategien radioaktiver Abfälle aus Sicht kommunaler Entscheidungsträger und lokaler Bevölkerung“. Vortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 12.11.2014
- Fellhauer D. (2014) Vorstellung Arbeitspaket 4.4 „Radionuklidquellterme für verschiedene Entsorgungsoptionen“. Poster. 1. Beiratstreffen, Hannover, 29.04.2014
- Franz M. (2014) Techniklauseln bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Vortrag. 2. ENTRIA Bearbeitertreffen, Goslar, 19.03.2014
- Gupta D. K. et al. (2014) The impact of the U(VI) speciation on U(VI) uptake and stress response in *Pisum sativum*. Poster. IGD-TP Geodisposal 2014, Manchester, Vereinigtes Königreich Großbritannien, 24.-26.06.2014
- Gupta D. K. et al. (2014) Uranium exposure reduce NO generation but increase H₂O₂ production in *pisum sativum* plants. Poster. 5th Plant NO Club Meeting, München-Nymphenburg, 24.-25.-07-2014
- Gupta D. K. et al. (2014) Effect of Uranium on photosynthetic parameters in *Pisum sativum* in conjugation with antioxidant defense. Poster. 11th International Phytotechnologies Conference, Heraklion, Griechenland, 30.09.-03-10-2014
- Gupta D. K. und Walther C. (2014) Radionuclide (uranium) contamination and remediation through phytoremediation techniques. Poster. 2nd International Science-Technical Conference, Ekaterinburg, Russland, 10.-14.11.2014
- Häfner D. (2014) Gesellschaftliche Komplexität: Mehr als 160 Akteure bei der Endlagersuche. Vortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 12.11.2014
- Häfner D. (2014) Nuclear Waste Governance. Poster. Heraeus Summer School „Ionising Radiation and Protection of Man“, Bad Honnef, 11.-22.08.2014
- Hassel T. (2014) Vorstellung Arbeitspaket 6.5 und 6.6 „Behälterdossiers“. Vortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 13.11.2014

- Hassel T., Köhler A. und Jakob H. (2014) Arbeitsinhalte AP 6.5 und 6.6. Poster. 2. Beiratstreffen, Berlin, 29.04.2014
- Hocke P. (2014) Erweiterte Öffentlichkeitsbeteiligung bei der nuklearen Entsorgung. Deutschland und Schweiz im Vergleich. Vortrag. Internationale Konferenz NTA6-TA14 „Responsible innovation. Neue Impulse für die Technikfolgenabschätzung“, Wien, Österreich, 03.06.2014. Eingeladen
- Hocke P. (2014) Long-term Stewardship als Konzept der nuklearen Entsorgung. Impulsvortrag. ENTRIA-Arbeitstreffen ITAS-INE, Karlsruhe, 07.01.2014
- Hocke P. (2014) Vorstellung Transversalprojekt 2 „ENTRIA-Kommunikationskonzept und skeptische Umwelten“. Impulsvortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 12.11.2014
- Hocke P. (2014) Always the same old story? Poster. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 13.11.2014
- Hocke P. et al. (2014) Arbeitspaket 2.1 „Governance zwischen Wissenschaft und öffentlichem Protest“. Poster. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 13.11.2014
- Jakob H. (2014) Vorstellung von Dossiers zur Darstellung von Behältersystemen. Vortrag. 2. ENTRIA Bearbeitertreffen, Goslar, 19.03.2014
- Kalmbach K. (2014) UmweltexpertInnen. Kommentar. Transformations of the Ecology Movement. From the 'Limits to Growth' (1972) to the Rio Conference (1992), Berlin, 15.11.2014. Eingeladen
- Kalmbach K. (2014) Kommentar zu „Italian Scientists, the Press, and the Promotion of a New Global Environmental Awareness in the 1970s“. Kommentar. Transformations of the Ecology Movement. From the 'Limits to Growth' (1972) to the Rio Conference (1992), Berlin, 14.-15.11.2014. Eingeladen
- Köhnke D. und Reichardt M. (2014) Technical Concepts for Storing HLW. Monitoring, Renewal and Refurbishment of Storage Facilities. Vortrag. 19th REFORM Group Meeting, Salzburg, Österreich, 02.09.2014. Eingeladen
- Köhnke D. und Reichardt M. (2014) Vom Entwurf zum fertigen Bauwerk – Aufgabengebiete des Bauingenieurwesens und spezielle Anforderungen kerntechnischer Anlagen. Impulsvortrag. 2. ENTRIA Bearbeitertreffen, Goslar, 19.03.2014
- König C. (2014) Vorstellung Arbeitspaket 2.3 „Kritische Evaluation der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum §47 der Strahlenschutzverordnung“. Vortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 12.11.2014
- König C., Walther C. und Smeddinck U. (2014) Critical evaluation of German regulatory specifications for calculating radiological exposure.

- Poster. 1. DAEF Tagung „Key Topics in Deep Geological Disposal“, Köln, 24.-26.09.2014
- Kreusch J. (2014) Sicherheitsfunktionen und Robustheit. Impulsvortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 12.11.2014
- Kreusch J. (2014) Methodische Anforderungen bei der vergleichenden Bewertung von Entsorgungsoptionen. Impulsvortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 12.11.2014
- Kuppler S. (2014) Komplexität gesellschaftlicher Entscheidungsfindung. Impulsvortrag. 2. ENTRIA Bearbeitertreffen, Goslar, 20.03.2014
- Kuppler S. und Hocke P. (2014) Vorstellung Arbeitspaket 2.1 „Der deutsche Fall als Referenz für internationale Vergleichsstudien“. Vortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 12.11.2014
- Kuppler S. und Hocke P. (2014) Empirischer Forschungsansatz, Arbeitspaket 2.1. Poster. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 13.11.2014
- Li X. (2014) Weiterentwicklung der Softwareplattform ReSUS. Poster. 1. Beiratstreffen, Hannover, 29.-30.04.2014
- Lux K.-H. (2014) Vorstellung Vertikalprojekt 5. Vortrag. 1. Beiratstreffen, Hannover, 29.04.2014
- Lux K.-H. (2014) Referenzmodelle für Optionenvergleich – Abstimmung. Vortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 13.11.2014
- Lux K.-H., Wolters R. und Zhao J. (2014) Vorstellung Arbeitspakete 5.1 und 5.2. Vortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 13.11.2014
- Marti M. (2014) Risikokonzepte. Impulsvortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 12.11.2014
- Marti M. (2014) Projektkommunikation. Impulsvortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 13.11.2014
- Marti M. Gesellschaftliche Aspekte rund um die Endlagerung von radioaktiven Abfällen. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4 und Risiko-Workshop, Zürich
- Marti M. (2014) Interdisziplinarität. Impulsvortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 13.11.2014
- Metz V. (2014) Ermittlung und Bewertung radiologischer Risiken – individuelle Dosimetrie für Beschäftigte in Entsorgungsanlagen radioaktiver Abfälle. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4 und Vertikalprojekt, Hannover, 29.07.2014
- Mez L. (2014) Status and Perspectives of „Energiewende“ and Germany’s Energy Policy. Vortrag. La transición energética en México: Qué aprender de la experiencia alemana?, Mexiko-Stadt, Mexiko, 15.10.2014. Keynote

- Neumann W. (2014) Langzeitige Lagerung der Abfälle in Bauwerken. Impulsvortrag. Treffen Transversalprojekt 4 und Vertikalprojekt, Hannover, 29.07.2014
- Plischke E. (2014) Bericht zur Exkursion zum niederländischen Langzeitzwischenlager Habog (Februar 2014). Bericht. 2. ENTRIA Bearbeiter-treffen, Goslar, 19.03.2014
- Plischke E. (2014) Vorstellung Arbeitspaket 4.1 „Langzeitsicherheit von Tiefenlagern“. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4 und Risiko-Workshop, Zürich, 09.07.2014
- Plischke E. (2014) Zusammenfassung der Zeiträume Diskussion. Vortrag. 3. ENTRIA Bearbertertreffen, Kiel, 17.09.2014
- Plischke E. (2014) Zeitbegriff der numerischen Modellierung. Vortrag. 3. ENTRIA Bearbertertreffen, Kiel, 17.09.2014
- Plischke E. (2014) Tiefenlagerung nach Verschluss, Sicherheitsbewertung und Risiko. Vortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 12.11.2014
- Pönitz E. (2014) AP 4.2 – Vergleich der radiologischen Gefährdung. Poster. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 13.11.2014
- Reichardt M. (2014) Die obertägige Langzeitzwischenlagerung von radioaktiven Reststoffen am Beispiel der Niederlande. Vortrag. Forum für Umwelt- und Planungsrecht in Praxis und Wissenschaft, Halle, 24.06.2014. Eingeladen
- Riemann M. (2014) Theorien intergenerationaler Gerechtigkeit / Fairness. Impulsvortrag. 2. ENTRIA Bearbertertreffen, Goslar, 20.03.2014
- Röhlig K.-J. (2014) Introduction – Roles of storage when managing radioactive wastes, centralised or de-centralised storage: issues to be considered. Vortrag. 19th REFORM Group Meeting, Salzburg, Österreich, 02.09.2014. Keynote
- Röhlig K.-J. (2014) Sprecherprojekt, Einführung der Vorträge zu den Teilprojekten. Vortrag. 1. Beiratstreffen, Hannover, 29.04.2014
- Röhlig K.-J. (2014) Langzeitsicherheitsnachweis / Safety Case (Tiefenlager). Impulsvortrag. Treffen Transversalprojekt 4 und Vertikalprojekt, Hannover, 29.07.2014
- Schepperle J. et al. (2014) Solubility and Hydrolysis of NpO_2 (am) and PuO_2 (am) in Dilute to Concentrated NaCl Solutions. Poster. International Symposium on Solubility Phenomena and Related Equilibrium Processes (ISSP) 2014, Karlsruhe, 21.07.2014
- Semper F. (2014) Rechtswissenschaftliche Voraussetzungen von Langzeitinstitutionen. Vortrag. 3. ENTRIA Bearbertertreffen, Kiel, 17.03.2014
- Smeddinck U. (2014) Rückholung in Standortauswahlgesetz und Atomgesetz. Impulsvortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 12.11.2014

- Stahlmann J. (2014) Messdaten versus Modellvorstellungen – Erfahrungen am in-situ Versuchsbauwerk im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben. Vortrag. Fachseminar „Messen in der Geotechnik“, Braunschweig, 20.02.2014. Eingeladen
- Stahlmann J. (2014) Vorstellung Vertikalprojekt 6. Vortrag. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 13.11.2014
- Stahlmann J. et al. (2014) Geologische und geotechnische Grenzen der Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus geologischen Teufenlagern. Poster. 3. ENTRIA Projekttreffen, Goslar, 13.11.2014
- Tawussi F. (2014) Grundlagen zum Strahlenschutz. Natürliche und künstliche Strahlenexposition und ihre biologische Strahlenwirkung. Vortrag. 2. ENTRIA Bearbeitertreffen, Goslar, 20.03.2014
- Walther C. (2014) Vergleich der radiologischen Gefährdung für verschiedene Entsorgungsoptionen. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4 und Risiko-Workshop, Zürich, 09.07.2014
- Wolters R. (2014) Comparison of two Modeling Procedures to Evaluate Thermal-Hydraulic-Mechanical Processes in a Generic Salt Repository for High-Level Nuclear Waste. Vortrag. 48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, Minneapolis, USA, 01.-04.06.2014. Eingeladen
- Wolters R. und Rutqvist J. (2014) THM-coupled processes in rock salt with special attention to two-phase flow. Vortrag. 5th US/German Workshop on Salt Repository Research, Design and Operation, Santa Fe, USA, 10.09.2014. Eingeladen
- Wolters R. und Zhao J. (2014) Überlegungen zur Zeitabhängigkeit von Risiken im Hinblick auf den Vergleich der drei Entsorgungsoptionen – Versuch einer ersten Strukturierung von Teilgebieten der Risikolandschaft. Vortrag. 3. ENTRIA Bearbeitertreffen, Kiel, 17.09.2014

2015

- Becker F. (2015) Grundlagen Low Dose Regime. Vortrag. 4. ENTRIA Bearbeitertreffen, Berlin, 16.04.2015
- Becker F. (2015) Personendosimetrie: Grenzwerte bei Behälterhandhabung. Vortrag. ENTRIA Behälter-Workshop, Garbsen, 06.10.2015
- Blanco Martín L. et al. (2015) Three-dimensional modeling of a heater test to investigate crushed salt reconsolidation and rock salt creep for the underground disposal of heat-generating nuclear waste. Vortrag. 13th International Congress on Rock Mechanics, Montréal, Kanada, 10.-13.05.2015. Eingeladen

- Bozau E. (2015) Vorstellung Arbeitspaket 5.3. Vortrag. 4. ENTRIA Bearbeitertreffen, Berlin, 13.04.2015
- Budelmann H. (2015) Vertikalprojekt 7: Referenzmodelle. Vortrag. Abstimmung der ENTRIA-Referenzmodelle, Braunschweig, 23.06.2015
- Budelmann H. (2015) Plädoyer für die „Langfristige Oberflächenlagerung“. Vortrag. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Budelmann H. und Köhnke D. (2015) Oberflächenlagerung hochradioaktiver Reststoffe. Vortrag. 2. Beiratstreffen, Berlin, 11.-12.03.2015
- Chaudry S. (2015) Bewertungsgrundlagen von Optionen. Vortrag. 4. ENTRIA Bearbeitertreffen, Berlin, 13.04.2015
- Chaudry S. (2015) Stand der Arbeiten zum Sammelband „Trans- und Interdisziplinarität bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe“. Vortrag. 4. ENTRIA Bearbeitertreffen, Berlin, 14.04.2015
- Chaudry S. (2015) Experimentelle Untersuchungen zur Verteilung von Spurenelementen zwischen detritischen Mineralen und hochsalinaren Lösungen. Vortrag. Kolloquium der technisch-naturwissenschaftlichen Doktoranden, Braunschweig, 09.10.2015
- Chaudry S. (2015) Rückholbare Tiefenlagerung – eine Gegenrede. Vortrag. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Di Nucci M. R. und Brunnengräber A. (2015) Deconstructing „acceptance“ – Siting of radioactive waste repository from societal and scientific perspectives. Introduction. Vortrag. 20th REFORM Group Meeting, Salzburg, Österreich, 31.08.2015. Keynote
- Drögemüller C. (2015) Öffentlichkeitsbeteiligung. Impulsvortrag. ENTRIA-Arbeitspaket-Leiter-Treffen, Clausthal-Zellerfeld, 02.03.2015
- Eckhardt A. und Rippe K. P. (2015) Risiken und Ungewissheiten. Vortrag. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Feierabend J. (2015) Multiphysikalische Prozessanalyse für geologische Tiefenlager nach Verschluss unter besonderer Berücksichtigung einer Monitoringphase. Vortrag. Kolloquium der technisch-naturwissenschaftlichen Doktoranden, Braunschweig, 09.10.2015
- Fellhauer D. (2015) Radionuklid-Quelltermabschätzungen für verschiedene genreische Entsorgungsoptionen. Vortrag. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 04.11.2015
- Fellhauer D. et al. (2015) Np(V) solubility and speciation in alkaline NaCl solutions. Poster. Workshop on Actinide-Brine-Chemistry in a Salt-Based Repository IV, Heidelberg, 14.-15.04.2015
- Fellhauer D. et al. (2015) Neptunium(V) solubility and hydrolysis in dilute to concentrated chloride solutions relevant for nuclear waste disposal. Vortrag. International Conference on Solution Chemistry 2015, Prag, Tschechische Republik, 01.09.2015

- Ghofrani J. (2015) Further Development of the Software Platform ReSUS. Vortrag. Kolloquium der technisch-naturwissenschaftlichen Doktoranden, Braunschweig, 09.10.2015
- Gupta D. K. et al. (2015) Oxidative stress generated by moderate uranium in *Pisum sativum* plants. Vortrag. RAD 2015, Budva, Montenegro, 11.06.2015
- Häfner D. (2015) Überblick Akteurs-Screening. Vortrag. 4. ENTRIA Bearbeitertreffen, Berlin, 13.04.2015
- Häfner D. (2015) Beteiligungsverfahren im Low Dose Bereich Involvierten Akteure und Vergleich mit dem Screening. Vortrag. 4. ENTRIA Bearbeitertreffen, Berlin, 16.04.2015
- Hassel T. (2015) Long-Term Governance und Monitoring. Vortrag. Internes Vorbereitungstreffen Monitoring Workshop, Karlsruhe, 18.05.2015. Eingeladen
- Hassel T. (2015) Behälterworkshop. Workshop. ENTRIA-Arbeitspaket-Leiter-Treffen, Clausthal-Zellerfeld, 02.03.2015
- Hassel T. (2015) Behälterkonzept im Referenzmodell. Vortrag. Abstimmung der ENTRIA-Referenzmodelle, Braunschweig, 23.06.2015
- Hassel T. (2015) Erstellung von generischen Behältermodellen. Vortrag. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 04.11.2015
- Hassel T., Köhler A. und Jakob H. (2015) ENCON – Erstellung generischer Behältermodelle. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Hassel T., Köhler A. und Jakob H. (2015) Behälterdossiers – Darstellung existierender Behältermodelle. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Hocke P. (2015) Long-term Stewardship als Konzept der nuklearen Entsorgung. Impulsvortrag. ENTRIA-Workshop, Karlsruhe, 05.02.2015
- Hocke P. (2015) Grenzen und Möglichkeiten sozialwissenschaftlicher Entsorgungsforschung. Impulsvortrag. 6. Sitzung der DAEF, Karlsruhe, 23.04.2015
- Hocke P. (2015) Stand der Dinge in der deutschen Entsorgungspolitik. Impulsvortrag. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 04.11.2015
- Hocke P. und Röhlig K.-J. (2015) Safety Case, Interdisziplinarität und Transdisziplinarität. Vortrag. Autoren-Workshop zum ENTRIA-Sammelband, Fulda, 30.03.2015
- Jakob H. und Reichardt M. (2015) Umgang mit geringfügigen Belastungen durch ionisierende Strahlung am Beispiel der Dekontamination von Bauteilen und Abriss von Gebäudestrukturen beim Rückbau von Kernkraftwerken. Vortrag. 4. ENTRIA Bearbeitertreffen, Berlin, 16.04.2015

- Jantschik K. (2015) Time dependent deformation behavior of salt concrete – Laboratory investigations and modeling activities. Vortrag. 13th International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures, Toulouse, Frankreich, 31.05.-04.06.2015
- Kalmbach K. (2015) Was werden wir aus Tschernobyl lernen? Vortrag. Kontinuität und Wandel von Vorsorgeregimen und Risikodebatten, Freiburg, 20.11.2015. Eingeladen
- Kalmbach K. (2015) Utopia or Dystopia? Cultural Representation of Nuclear Energy in Western European Anti-Nuclear Movements. Vortrag. 7th Tensions of Europe Conference „Technology and Environment“, Stockholm, Schweden, 05.09.2015. Eingeladen
- Kalmbach K. (2015) Chernobyl: Coping with the Aftermath of a Nuclear Disaster. Vortrag. ASEH annual conference. Turning Protest into Policy: Environmental Values and Governance in Changing Societies, Washington, 19.03.2015
- Kalmbach K. und Di Nucci M. R. (2015) Text NIMBY (Ian Welsh) vorstellen und in Kleingruppen diskutieren. Vortrag. 4. ENTRIA Bearbeitertreffen, Berlin, 16.04.2015
- Köhnke D. (2015) Prognose der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen in Zwischenlagern für hochradioaktive Reststoffe. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- König C. (2015) Remediation of radioactive residues: risk communication in practice. Vortrag. Regulatory Supervision of Legacy Sites: from Recognition to Resolution, Oslo, Norwegen, 17.-19.11.2015. Eingeladen
- König C. (2015) Kritische Evaluation der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum §47 der Strahlenschutzverordnung. Vortrag. Kolloquium der technisch-naturwissenschaftlichen Doktoranden, Braunschweig, 08.10.2015
- Kreusch J. (2015) Sicherheitsfunktionen – ein Beitrag zum risikoorientierten Vergleich von Entsorgungsoptionen? Vortrag. 2. Beiratstreffen, Berlin, 12.03.2015
- Kreusch J. und Neumann W. (2015) Vergleich von Entsorgungsoptionen mittels Sicherheitsfunktionen und Robustheit als Beitrag zum Risikovergleich. Impulsvortrag. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 06.11.2015
- Kuppler S. (2015) Gegenrede zum Plädoyer „Langfristige Oberflächenlagerung“. Vortrag. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Kuppler S. und Grunwald A. (2015) The Swiss approach to finding compromises in nuclear waste governance. Vortrag. 1. DAEF Tagung „Key Topics in Deep Geological Disposal“, Köln, 25.09.2015. Eingeladen

- Kuppler S. und Hocke P. (2015) „Enabling“ public participation in a social conflict. Nuclear waste governance in Germany. Vortrag. 2nd European TA Conference „The next horizon of technology assessment“ (PACITA), Berlin, 27.02.2015. Eingeladen
- Léon Vargas R. P. (2015) Auswirkung der Wärmeentwicklung eingelagerter HAW auf die Auslegung eines Tiefenlagers. Vortrag. ENTRIA Behälter-Workshop, Garbsen, 06.10.2015
- Lux K.-H. et al. (2015) Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (wartungsfreie Tiefenlagerung) – Methodik. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Lux K.-H. et al. (2015) Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (wartungsfreie Tiefenlagerung) – Salinargebiete. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Lux K.-H. et al. (2015) Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (wartungsfreie Tiefenlagerung) – Tonsteingebiete. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Mbah M. (2015) Deep Geological Repositories for Nuclear Waste Storage as Socio-Technological Artefacts. Vortrag. STS-Konferenz „Living in Technoscientific Worlds“, Wien, Österreich, 04.12.2015. Eingeladen
- Mbah M. (2015) Participation in Nuclear Waste Governance – the ENTRIA-Project. Vortrag. ENGAGE 2020 final Conference „Engaging Society in Responsible Research and Innovation: What’s Next?, Brüssel, Belgien, 10.11.2015. Eingeladen
- Mbah M. (2015) Partizipation – State of the Art aus sozialwissenschaftlicher Sicht. Vortrag. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 04.11.2015
- Mbah M. und Kuppler S. (2015) Ansprüche an Kommunikation und Zusammenarbeit in interdisziplinären Teams. Vortrag. 4. ENTRIA Bearbeitertreffen, Berlin, 15.04.2015
- Missal C., Döring I. und Stahlmann J. (2015) Comparison of Triaxial Strength Tests of Clean Halite and Argillaceous Halite from the WIPP. Poster. 48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, Minneapolis, USA, 01.-04.06.2015
- Neumann W. (2015) Konflikte im Low Dose Regime – Freigabe radioaktiver Stoffe. Vortrag. 4. ENTRIA Bearbeitertreffen, Berlin, 15.04.2015
- Pang B., Saurí Suárez H. und Becker F. (2015) Individual dosimetry in final disposal repository of heat-generating nuclear waste. Vortrag. International Conference on Individual Monitoring of Ionising Radiation, Brügge, Belgien, 24.04.2015

- Plischke E. (2015) Estimating Global Sensitivity Measures: Torturing the Data Until They Confess. Vortrag. „Groupement de Recherche MASCOT-NUM” Meeting, St. Étienne, Frankreich, 02.04.2015. Eingeladen
- Plischke E. und Borgonovo E. (2015) Copula-based Sensitivity Measures of Computer Experiments. Vortrag. 25th European Safety and Reliability Conference, Zürich, Schweiz, 08.09.2015
- Pönitz E. (2015) Materialien und Konzepte für die Strahlungsabschirmung. Vortrag. ENTRIA Behälter-Workshop, Garbsen, 06.10.2015
- Pönitz E. (2015) AP 4.2 – Vergleich der radiologischen Gefährdung. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Reichardt M. (2015) Zur Berücksichtigung hochdynamischer Beanspruchungen auf gealterte Baustrukturen. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Reichardt M. (2015) Spezielle Anforderungen an einen Behälter für eine längerfristige oberflächennahe Zwischenlagerung. Vortrag. ENTRIA Behälter-Workshop, Garbsen, 06.10.2015
- Reichardt M. (2015) Zur Berücksichtigung hochdynamischer Beanspruchungen bei der Bemessung von Baustrukturen. Vortrag. Kolloquium der technisch-naturwissenschaftlichen Doktoranden, Braunschweig, 09.10.2015
- Riemann M. (2015) The Ethics of Radioactive Waste Management. Vortrag. GRN meets ISEE, Kiel, 22.07.2015
- Riemann M. (2015) Das ENTRIA-Bürgerforum – Wohin mit unserem Atommüll? Vortrag. 2. Beiratstreffen, Berlin, 11.03.2015
- Riemann M. (2015) Interdisziplinäre Urteilsbildung. Vortrag. 4. ENTRIA Bearbeitertreffen, Berlin, 14.04.2015
- Riemann M. (2015) Gegenrede zum Plädoyer für „Endlagerung ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit“. Vortrag. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 04.11.2015
- Rippe K. P. (2015) Risiken, Ungewissheit, Unwissen. Eine ethische Analyse zur Wahl zwischen Entsorgungsoptionen. Vortrag. 2. Beiratstreffen, Berlin, 12.03.2015
- Röhlig K.-J. (2015) Referenzkonzepte Tiefenlagerung. Vortrag. Abstimmung der ENTRIA-Referenzmodelle, Braunschweig, 23.06.2015
- Saurí Suárez H. (2015) Monte-Carlo Calculations of the Radiation Field in a Rock Salt Horizontal Emplacement Gallery of an Underground Nuclear Waste Disposal Facility. Vortrag. 46. Jahrestagung Kerntechnik, Berlin, 06.05.2015
- Saurí Suárez H. (2015) Monte-Carlo Studie über Personen-Tiefendosen bei Endlagerung in tiefen geologischen Formationen. Vortrag. Kollo-

- quium der technisch-naturwissenschaftlichen Doktoranden, Braunschweig, 08.10.2015
- Saurí Suárez H. et al. (2015) Monte-Carlo calculation of the depth-dose rate curve for employees of an underground nuclear waste disposal facility. Poster. INE-ITU Research Fellows Day, Karlsruhe, 14.10.2015
- Saurí Suárez H. et al. (2015) Untersuchung der individuellen Personendosis für Entsorgungs-optionen mittels Monte-Carlo Methode. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Schepperle J. et al. (2015) Solubility, Hydrolysis and Carbonate Complexation of $\text{NpO}_2(\text{am})$ and $\text{PuO}_2(\text{am})$ in Dilute to Concentrated NaCl Brines. Poster. Workshop on Actinide-Brine-Chemistry in a Salt-Based Repository IV, Heidelberg, 14.-15.04.2015
- Schepperle J. et al. (2015) Solubility, Hydrolysis and Carbonate Complexation of $\text{Np}(\text{IV})$ and $\text{Pu}(\text{IV})$ in Dilute to Concentrated NaCl Brines. Poster. GDCh Wissenschaftsforum Chemie 2015, Dresden, 30.08.-02.09.2015
- Schepperle J. et al. (2015) Solubility Behavior of $\text{NpO}_2(\text{am,hyd})$ and $\text{PuO}_2(\text{am,hyd})$ in Dilute to Concentrated NaCl Solutions. Poster. Migration 2015, Santa Fe, USA, 15.09.2015
- Schreurs M. A. (2015) Governance und Beteiligung im Standortauswahlverfahren im internationalen Vergleich. Vortrag. 1. Symposium HAW-Endlagerung, Hannover, 04.02.2015. Eingeladen
- Schreurs M. A. (2015) Nuclear Waste Governance. An International Comparison. Buchpräsentation. Berlin Conference on Energy and Electricity Economics, Berlin, 28.05.2015. Eingeladen
- Schreurs M. A. (2015) Nuclear Waste Governance. An International Comparison. Buchpräsentation. 2. Beiratstreffen, Berlin, 12.03.2015
- Semper F. (2015) Rechtsschutz im Standortauswahlgesetz. Vortrag. Symposium „Atommüllrecht“, Hannover, 23.10.2015
- Smeddinck U. (2015) Innovative Ansätze im Umweltrecht. Vortrag. Kolloquium „Innovationen im Recht“ der Bucerius Law School, Hamburg, 07.03.2015. Eingeladen
- Smeddinck U. (2015) Die Kritik am Standortauswahlgesetz aus rechtswissenschaftlicher Perspektive. Vortrag. 22. Berliner Forum „Spannungsfeld Atomrecht: Anforderungen an die Endlagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“, Berlin, 06.05.2015. Eingeladen
- Smeddinck U. (2015) Standortauswahlgesetz und Nationales Entsorgungsprogramm. Vortrag. Symposium „Atommüllrecht“, Hannover, 23.10.2015
- Stahlmann J. (2015) Sustainable Lining in Incompetent Rock Mass using the Example of Konrad Mine. Vortrag. EUROCK15. 64. Geomechanik Kolloquium, Salzburg, Österreich, 07.10.2015

- Stahlmann J. (2015) Interaction between salt concrete sealing structures and rock salt. Vortrag. SALTMECH VIII. Conference on Mechanical Behavior of Salt, Rapid City, USA, 26.05.2015
- Stahlmann J. (2015) Plädoyer für „Einlagerung mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit“. Vortrag. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Stahlmann J., Mintzlaff V. und Léon Vargas R. P. (2015) Geologische und geotechnische Grenzen der Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Stahlmann J., Mintzlaff V. und Léon Vargas R. P. (2015) Entwicklung eines Normalszenarios für generische Tiefenlagermodelle. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Stahlmann J., Mintzlaff V. und Léon Vargas R. P. (2015) Monitoring eines generischen Tiefenlagers. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Stahlmann J., Mintzlaff V. und Léon Vargas R. P. (2015) Auswirkung der Wärmeentwicklung eingelagerter HAW auf die Auslegung von Tiefenlagern mit Rückholbarkeit. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Stahlmann J., Mintzlaff V. und Léon Vargas R. P. (2015) Randbedingungen für die Auslegung eines Tiefenlagers. Vortrag. Abstimmung der ENTRIA-Referenzmodelle, Braunschweig, 23.06.2015
- Tawussi F. (2015) Einfluss der Speziation auf die Radionuklidaufnahme von Pflanzen. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Tawussi F. (2015) Einfluss der Radionuklidspeziation auf die Plutonium-Aufnahme. Vortrag. Kolloquium der technisch-naturwissenschaftlichen Doktoranden, Braunschweig, 08.10.2015
- Walther C. et al. (2015) Vorstellung Arbeitspakete 4.2 und 4.5 „Vergleich der radiologischen Gefährdung für verschiedene Entsorgungsoptionen und individuelle Dosimetrie für Beschäftigte in Entsorgungsanlagen“. Vortrag. 2. Beiratstreffen, Berlin, 11.03.2015
- Wulf N. (2015) Die schwedische Endlagersuche. Zur Rolle von Expertise und der Kommunikation von Wissen und Nichtwissen. Vortrag. ITAS-Doktorandenvortrag, Karlsruhe, 16.11.2015
- Wulf N. (2015) Die schwedische Endlagersuche. Zur Rolle von Expertise und der Kommunikation von Wissen und Nichtwissen. Poster. 4. ENTRIA Projekttreffen, Braunschweig, 05.11.2015
- Zhao J. (2015) Multiphysikalische Prozessanalyse für geologische Tiefenlager in der Nachverschlussphase – Ein Beitrag zum Vergleich von Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle mit passiver Gewährleistung

der langfristigen Sicherheit. Vortrag. Kolloquium der technisch-naturwissenschaftlichen Doktoranden, Braunschweig, 08.10.2015

2016

- Bozau E. (2016) Grundwassermodelle zur Schadstoffausbreitung im Deckgebirge. Vortrag. Bilaterales Treffen TU Clausthal KIT-INE, Clausthal-Zellerfeld, 28.06.2016
- Bozau E. und Mengel K. (2016) Hydrogeochemische Transportmodellierung, Schadstoffausbreitung im Deckgebirge. Poster. 5. ENTRIA Projekttreffen, Berlin, 16.11.2016
- Bozau E. und Mengel K. (2016) PHAST-Modellierung der Schadstoffausbreitung im Deckgebirge, Anpassung an geologische Situation. Poster. 5. ENTRIA Projekttreffen, Berlin, 16.11.2016
- Budelmann H. (2016) Subsequent sensor installation for corrosion monitoring of reinforced concrete structures. Vortrag. IALCCE 2016. Fifth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Delft, Niederlande, 17.10.2016. Eingeladen
- Budelmann H. (2016) Warum eine längerfristige Oberflächenlagerung von HLW? Vortrag. Fachtagung: Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.11.2016
- Budelmann H. (2016) Vorstellung Vertikalprojekt 7 – Weltkarte zur Zwischenlagerung hoch radioaktiver Reststoffe. Vortrag. 3. Beiratstreffen, Barsinghausen, 10.03.2016
- Drögemüller C. (2016) Entsorgungspolitik und Entsorgungsoptionen radioaktiver Abfälle aus Sicht lokaler Akteure. Vortrag. 5. ENTRIA Beiratsmeeting, Karlsruhe, 15.03.2016
- Fellhauer D. (2016) Radionuclide source term estimations for generic nuclear waste disposal options within the ENTRIA project. Poster. 17. International Symposium on Solubility Phenomena and Related Equilibrium Processes (ISSP) 2016, Genf, 28.07.2016
- Fellhauer D. (2016) Radionuklid-Quelltermabschätzungen für verschiedene generische Entsorgungsoptionen. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4, Delémont, Schweiz, 07.04.2016
- Fellhauer D. (2016) Radionuklid-Quelltermabschätzungen für verschiedene generische Entsorgungsoptionen. Vortrag. Bilaterales Treffen TU Clausthal KIT-INE, Clausthal-Zellerfeld, 28.06.2016
- Fellhauer D., Gaona X. und Altmaier M. (2016) Solubility, hydrolysis and chloride complexation of Np(V) in alkaline, dilute to concentrated NaCl,

- MgCl₂ and CaCl₂ solutions. Poster. Plutonium Futures – The Science 2016, Baden-Baden, 21.09.2016
- Fellhauer D. et al. (2016) Estimation of radionuclide source terms for generic nuclear waste disposal options within the ENTRIA project. Poster. 2. DAEF Tagung „Key Topics in Deep Geological Disposal“, Köln, 27.09.2016
- Geckeis H. (2016) Die „Kupfer-Kontroverse“. Vortrag. 5. ENTRIA Projekt-treffen, Berlin, 16.11.2016. Keynote
- Grunwald A. (2016) Socio-technical decision criteria and criteria for error corrections. Vortrag. 2. DAEF Tagung „Key Topics in Deep Geological Disposal“, Köln, 27.09.2016. Eingeladen
- Häfner D. (2016) German Experiences in Public Participation Concerning Nuclear Facilities. Vortrag. The 11th International Public Forum-Dialo-gue „Nuclear Energy, Environment, Safety – 2016“, Moskau, Russland, 23.11.2016. Eingeladen
- Häfner D. (2016) The Challenges of Nuclear Waste Disposal Perspective on Participation and Acceptance in Siting Procedures. Vortrag. Fachgespräch „Public Participation in Germany“, Berlin, 26.09.2016. Einge-laden
- Hassel T. (2016) Vorstellung Arbeitspakete 6.5 und 6.6. Vortrag. 5. ENT-RIA Projekttreffen, Berlin, 16.11.2016
- Hocke P. et al. (2016) Vorstellung Arbeitspaket 2.1 „Governance zwischen Wissenschaft und öffentlichem Protest“ Robuste Ergebnisse aus dem ITAS-Team. Vortrag. 5. ENTRIA Projekttreffen, Berlin, 17.11.2016
- Hocke P. und Brunnengräber A. (2016) Nukleare Entsorgung als Meh-rebenenproblem. Zur Untersuchung der Wirkung von Technik- und Infrastrukturkonflikten im Entscheidungssystem der Bundesrepublik Deutschland. Vortrag. 3-Länder-Tagung der deutschsprachigen polito-logischen Gesellschaften, Heidelberg, 30.09.2016. Eingeladen
- Hocke P. und Kuppler S. (2016) Zwischen Grenzwerten, Long-term Gover-nance und technischem Monitoring. Impulsvortrag. 5. ENTRIA Projekt-treffen, Berlin, 17.11.2016
- Köhnke D. (2016) Herausforderungen, Lösungsansätze, Sicherheits- und Dauerhaftigkeitskonzepte. Vortrag. Fachtagung: Technische Aspek-te von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braun-schweig, 01.11.2016
- Léon Vargás R. P. (2016) Szenarien und Monitoring innerhalb des gene-rischen Tiefenlagerkonzepts. Vortrag. Fachtagung: Technische Aspek-te von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braun-schweig, 01.11.2016. Eingeladen

- Léon Vargas R. P. (2016) Auswirkung der Wärmeentwicklung eingelagerter HAW auf die Auslegung eines Tiefenlagers. Vortrag. 5. ENTRIA Bearbeitertreffen, Karlsruhe, 15.03.2016
- Léon Vargas R. P. und Stahlmann J. (2016) Thermal impact in the geometrical settings in deep geological repositories for HLW with retrievability. Poster. Annual Waste Management Symposium (WM) 2016, Phoenix, USA, 06.-10.03.2016
- Li X. (2016) Modelle zur Radionuklidmigration – ein Baustein zur Risikobewertung von Tiefenlagern. Vortrag. Fachtagung: Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 02.11.2016
- Lux K.-H. (2016) Von Lokal- zu Globalmodellen – ein Weg von Prozessverständnis zu Systemanalyse. Teil 1: Konzeptioneller und konfigurativer Ansatz. Vortrag. Fachtagung: Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 02.11.2016
- Lux K.-H. et al. (2016) Von Lokal- zu Globalmodellen – ein Weg von Prozessverständnis zu Systemanalyse. Konzeptioneller und konfigurativer Ansatz sowie Bausteine zur fluiddynamischen Analyse im Salinar- und Tonsteingebirge. Vortrag. 5. ENTRIA Projekttreffen, Berlin, 16.11.2016
- Lux K.-H. et al. (2016) High-level waste disposal in deep geological formations – Fluid dynamic processes within a closed repository with or without long-term monitoring (1/4 bis 4/4). Poster. 2. DAEF Tagung „Key Topics in Deep Geological Disposal“, Köln, 28.09.2016
- Metz V. (2016) Vorstellung Arbeitspakete 4.4 und 4.5. Vortrag. 5. ENTRIA Projekttreffen, Berlin, 16.11.2016
- Metz V. (2016) Szenarien für Arbeitspaket 4.5. Vortrag. Bilaterales Treffen TU Clausthal KIT-INE, Clausthal-Zellerfeld, 28.06.2016
- Mintzlaff V. (2016) Gegenüberstellung unterschiedlicher Wirtsgesteine auf Grundlage des generischen Tiefenlagerkonzepts. Vortrag. Fachtagung: Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.11.2016. Eingeladen
- Mintzlaff V. (2016) Monitoring requirements for deep geological repositories with retrievability. Vortrag. Workshop „Technical Monitoring and Long-term Governance“, Karlsruhe, 19.10.2016
- Montoya V. et al. (2016) Reactive transport model for the near field of different generic spent nuclear fuel repository options: effect of the radionuclide source term. Poster. 2. DAEF Tagung „Key Topics in Deep Geological Disposal“, Köln, 27.09.2016
- Neumann W. (2016) Wie sicher sind die Zwischenlager für hoch radioaktive Abfälle? Vortrag. Fachtagung „Probleme bei der Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle“, Würzburg, 25.11.2016. Eingeladen

- Ott K. (2016) Freiwilligkeit, Bereitschaft, Kompensation. Zum normativen Anspruch der Freiwilligkeit bei der Standortauswahl zur Lagerung radioaktiver Abfälle. Vortrag. ENTRIA-Werkstattgespräch „Umwelt, Gerechtigkeit, Freiwilligkeit“, Braunschweig, 28.01.2016
- Ott K. (2016) Vorstellung Arbeitspaket 3.1. Vortrag. 5. ENTRIA Projekt-treffen, Berlin, 16.11.2016
- Plischke E. (2016) Gini out of the bottle. Global sensitivity analysis with distance correlation and energy statistics. Vortrag. 26th European Safety and Reliability conference ESREL 2016 „Risk, Reliability and Safety. Innovating Theory and Practice“, Glasgow, Schottland, 28.09.2016
- Pönitz E. (2016) Vorstellung Arbeitspaket 4.2 „Vergleich der radiologischen Gefährdung“. Vortrag. Treffen Transversalprojekt 4, Delémont, Schweiz, 08.04.2016
- Pönitz E., Walther C. und Hassel T. (2016) Calculation of Dose Rates at the Surface of Storage Containers for High-Level Waste. Poster. 14th Congress of the International Radiation Protection Association, Kapstadt, Südafrika, 12.05.2016
- Reichardt M. (2016) Widerstand gegen extreme, äußere Einwirkungen. Fachvortrag. Fachtagung: Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.11.2016
- Reichardt M., Budelmann H. und Köhnke D. (2016) Vorstellung Vertikalprojekt 7. Vortrag. 5. ENTRIA Projekt-treffen, Berlin, 16.08.2016
- Röhlig K.-J. (2016) Vorstellung Ergebnisse IELF. Vortrag. 5. ENTRIA Projekt-treffen, Berlin, 16.11.2016
- Saurí Suárez H. (2016) Monte-Carlo based study of the depth-dose rate curve for employees in an underground nuclear waste disposal facility. Vortrag. 47. Jahrestagung Kerntechnik, Hamburg, 11.05.2016. Eingeladen
- Saurí Suárez H. (2016) Ph.D. Thesis: “Development of tools for individual dosimetry of employees. Vortrag. 2nd INR-PhD Seminar, Bad Herrenalb, 03.06.2016
- Saurí Suárez H. und Becker F. (2016) Vorstellung Arbeitspaket 4.5. Vortrag. 5. ENTRIA Bearbertertreffen, Karlsruhe, 14.03.2016
- Schepperle J. (2016) Status ENTRIA Doktorarbeit (AP 4.4) „Löslichkeit, Hydrolyse und Carbonatkomplexierung von Neptunium und Plutonium in verschiedenen Oxidationsstufen. Vortrag. 5. ENTRIA Bearbertertreffen, Karlsruhe, 15.03.2016
- Schepperle J. et al. (2016) Solubility, Hydrolysis and Carbonate Complexation of Plutonium and Neptunium under Repository-Relevant Conditions. Poster. Plutonium Futures – The Science 2016, Baden-Baden, 19.09.2016

- Smeddinck U. (2016) Umgang mit Ungewissheit bei einem Endlager für Atommüll. Vortrag. Wissenschaftliches Symposium „Management von Unsicherheit und Nichtwissen“, Speyer, 04.02.2016. Eingeladen
- Smeddinck U. (2016) Vorstellung Arbeitspaket 3.2. Vortrag. 5. ENTRIA Projekttreffen, Berlin, 16.11.2016
- Smeddinck U. und Semper F. (2016) Long-term Governance aus rechtswissenschaftlicher Sicht. Vortrag. Workshop „Technical Monitoring and Long-term Governance“, Karlsruhe, 19.10.2016
- Stahlmann J. (2016) Generisches Tiefenlagerkonzept zur Beurteilung der Rückholbarkeit. Vortrag. Fachtagung: Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 01.11.2016. Keynote
- Stahlmann J. (2016) Vorstellung Vertikalprojekt 6. Vortrag. 5. ENTRIA Projekttreffen, Berlin, 16.11.2016
- Walther C. (2016) Dose Limits in Radioactive Waste Management: Interdisciplinary Perspectives from the German ENTRIA Project. Vortrag. 14th Congress of the International Radiation Protection Association, Kapstadt, Südafrika, 09.05.2016
- Walther C. (2016) Vorstellung des interdisziplinären Projekts ENTRIA & einige Kommentare zum Kommissionsbericht. Vortrag. 62. Sitzung des „Arbeitskreis Entsorgung“ des Fachverbands für Strahlenschutz, Lubmin, 29.09.2016. Eingeladen
- Walther C. (2016) From Radioecology in Fukushima to the Disposal of High Level Waste. Vortrag. Kolloquium des Instituts für Radiochemie an der Moscow State University, Moskau, Russland, 20.10.2016. Eingeladen
- Wolters R. (2016) Fluid dynamic processes within a closed repository with or without long-term monitoring. Vortrag. 7th US/German Workshop on Salt Repository Research, Design and Operation, Washington, USA, 08.09.2016
- Wolters R. (2016) Von Lokal- zu Globalmodellen – ein Weg von Prozessverständnis zu Systemanalyse. Teil 2: Bausteine zur fluiddynamischen Analyse im Salinargebirge. Vortrag. Fachtagung: Technische Aspekte von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braunschweig, 02.11.2016
- Wulf N. (2016) Die schwedische Suche nach einem Endlagerstandort: Artikulationen von Wissen und Nichtwissen. Vortrag. 3. Beiratstreffen, Barsinghausen, 11.03.2016
- Wulf N. (2016) The Swedish Radioactive Waste Management: Articulations of Knowledge and Non-Knowledge. Poster. Proving Futures and Governing Uncertainties in Technosciences and Megaprojects. Foreknow-

ledge Assessment Series, 1st International Meeting, Paris, Frankreich,
12.-14.12.2016

Zhao J. (2016) Von Lokal- zu Globalmodellen – ein Weg von Prozessver-
ständnis zu Systemanalyse. Teil 3: Bausteine zur fluiddynamischen
Analyse im Tonsteingebirge. Vortrag. Fachtagung: Technische Aspek-
te von Optionen zur Entsorgung hochradioaktiver Reststoffe, Braun-
schweig, 02.11.2016

2017

Becker F. (2017) Monte-Carlo simulations for individual dosimetry in dis-
posal facilities for spent nuclear fuel. Vortrag. Research on Radioac-
tive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig,
27.09.2017

Bozau E. und Mengel K. (2017) Hydrogeochemical modeling of processes
induced by underground waste disposals. Poster. Research on Radioac-
tive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig,
26.-30.09.2017. Eingeladen. Geplant

Brunnengräber A. und Kuppler S. (2017) Same, same but different – Was
aus dem internationalen Vergleich gelernt werden kann. Vortrag. 4. Bei-
rattreffen, Karlsruhe, 14.03.2017

Budelmann H. (2017) Evolution of Technical requirements for Long-Term
Interim Storage Facilities. Vortrag. Research on Radioactive Waste Ma-
nagement: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 26.09.2017

Chaudry S. und Mintzlaff V. (2017) Geology of the Harz Mountains. Ex-
kursion. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society
– Technology, Braunschweig, 29.11.2017

Di Nucci M. R. (2017) In Whose Backyard? The Wicked Problem of Si-
ting Nuclear Waste Repositories. Vortrag. Research on Radioactive
Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig,
28.09.2017

Di Nucci M. R. (2017) In Whose Backyard? Voluntarism, Compensation
and Participation in the Siting of Nuclear Waste Repositories. Vortrag.
21st REFORM Group Meeting, Salzburg, 31.08.2017

Di Nucci M. R. und Hocke P. (2017) Governing Nuclear Waste. Podiums-
diskussion. 21st REFORM Group Meeting, Salzburg, 31.08.2017

Drögemüller C. (2017) Local Views on Disposal Options and Governance
of Radioactive Waste in Germany. A Sociological Analysis of the Sta-
tus Quo. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics
– Society – Technology, Braunschweig, 28.09.2017

- Grunwald A. (2017) Integrating knowledge for nuclear waste disposal. Beyond inter- and transdisciplinary research. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 27.09.2017. Eingeladen
- Häfner D. (2017) International Experiences in Public Participation concerning Nuclear Facilities. Expertengespräch. Presentation of the Report: Radwaste management projects and the public in Sweden, Finland, Germany, France and Russia, St. Petersburg, 27.-28.02.2017. Eingeladen
- Häfner D. (2017) Nuclear Waste Governance in Germany. Vortrag. 21st REFORM Group Meeting, Salzburg, 28.08.2017
- Häfner D. (2017) Lessons learned. Vortrag. Governing Nuclear Waste – Conflicts, Participation and Acceptability, Berlin, 20.09.2017
- Hassel T. und Bauer M. (2017) Monitoring in the deep geological disposal. Technical and social requirements for implementing monitoring of HLW containers. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 26.09.2017. Eingeladen
- Herrling D. (2017) ReSUS: Repository Simulation, Uncertainty Propagation and Sensitivity Analysis. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 28.09.2017
- Hocke P. (2017) Terms are more than words. The meaning of governance in the context of radioactive waste management. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 28.09.2017. Eingeladen
- Hocke P. (2017) Welche neuen Institutionen braucht das Land? Erste Überlegungen für robuste Arrangements zur Begleitung eines nuklearen Entsorgungsprozesses bis hinein in das nächste Jahrhundert. Vortrag. Jahrestagung, Fachverband für Strahlenschutz 2017, Hannover, 12.10.2017. Eingeladen
- Hocke P. (2017) Sozialwissenschaftliche Forschung über Fragen der nuklearen Entsorgung. Zum defizitären Forschungsstand. Vortrag. 12. Sitzung der DAEF, Leipzig, 17.10.2017. Eingeladen
- Hocke P. und Kuppler S. (2017) Contested forms of highly-complex governance in multi-level systems. Some results from ENTRIA's international comparison of nuclear waste politics. Vortrag. 21st REFORM Group Meeting, Salzburg, 01.09.2017. Eingeladen
- Köhler F. et al. (2017) Migration of ¹²⁹I in the biosphere – Chemical speciation and interaction with soil. Poster. Migration 2017, Barcelona, 12.09.2017
- Köhnke D. (2017) Study of the Heat Removal in an Interim Storage Facility for High Level Waste and Spent Fuel by Airflow due to Natural Con-

- vection. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 28.09.2017
- König C., Köhler F. und Walther C. (2017) Transfer processes of Iodine-129 in soil. Poster. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 26.09.2017
- Kuppler S. (2017) Hindrances and Supportive Factors on the Way towards a New Paradigm in RWM in Germany. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 26.09.2017. Eingeladen
- Kuppler S. (2017) Laie, Experte, oder was? Bürgerbeteiligung in der Forschung bei der Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle am Beispiel der Schweiz. Vortrag. Österreichischer Kongress für Soziologie, Graz, 08.12.2017
- Kuppler S. und Hocke P. (2017) Long-term-Governance bei langfristig wirkenden Großtechnologien. Anregungen für weitere Forschung am Beispiel der nuklearen Tiefenlagerung in Deutschland. Vortrag. Festvortrag im Rahmen des Forschungsbereichs Wissen am ITAS, Karlsruhe, 30.01.2017. Eingeladen
- Léon Vargas R. P., Stahlmann J. und Mintzlaff V. (2017) Thermal impact in the geometrical settings in deep geological repositories for HLW with retrievability and monitoring. Vortrag. International High-Level Radioactive Waste Management (IHLRWM 2017), Charlotte, USA, 12.04.2017
- Li X. (2017) 3-D Numerical Modeling and Probabilistic Analysis of RN-Transport Based on TMH2-Coupled Two Phase Flow Model for Clay Disposal. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 28.09.2017
- Li X. und Röhlig K.-J. (2017) ReSUS: A new probabilistic and sensitivity analysis software tool and its test examples. Vortrag. 3. Sino-German Workshop on Radioactive Waste Disposal, Dunhuang, China, 17.05.2017.
- Lux K.-H. (2017) Multiphysical process simulation and participation – two sides of a coin? Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 26.09.2017
- Mbah M. (2017) Participation and Deliberation in RWM – Challenges for Democracies. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 28.09.2017. Eingeladen
- Mengel L. (2017) Radiation Effects on Concrete. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 28.09.2017

- Mez L. (2017) The Decay of the Atomic Industry Complex. Vortrag. 21st REFORM Group Meeting, Salzburg, 31.08.2017
- Mintzlaff V., Léon Vargas R. P. und Stahlmann J. (2017) Gegenüberstellung von Wirtsgesteinen auf Grundlage eines generischen Tiefenlagerkonzeptes für die Entsorgung von hochradioaktiven Reststoffen. Vortrag. Fachsektionstage Geotechnik, Würzburg, 06.09.2017. Geplant
- Plischke E. (2017) Development of the Software Platform ReSUS (Repository Simulation, Uncertainty Propagation and Sensitivity Analysis). Poster. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 26.09.2017
- Pönitz E., Walther C. und Hassel T. (2017) Investigation of Dose Rates at the Surface of Generic Final Storage Casks. Poster. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 26.09.2017
- Reichardt M. (2017) Challenges Concerning Long-Term Resistance of Interim Storage Facilities Against Extreme Mechanical Loads and Modeling Approaches. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 28.09.2017
- Riemann M. (2017) Wait and Act! Why a Sound RWM-Strategy Depends on Long-Term Interim Storage. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 28.09.2017
- Schreurs M. A. und Brunnengräber A. (2017) Welcome and introduction. Vortrag. Governing Nuclear Waste – Conflicts, Participation and Acceptability, Berlin, 19.09.2017
- Semper F. Die wichtigsten Neuerungen des europäischen Strahlenschutzrechtes. Vortrag. Jahrestagung, Fachverband für Strahlenschutz 2017, Hannover. Eingeladen
- Smeddinck U. Neustart im Neustart? – Das Standortauswahlgesetz 2017. Vortrag. Jahrestagung, Fachverband für Strahlenschutz 2017, Hannover. Eingeladen
- Smeddinck U. (2017) Lernendes Recht: Das Standortauswahlgesetz. Vortrag. 4. Beiratstreffen, Karlsruhe, 13.03.2017
- Tawussi F. (2017) Influence of Chemical Speciation on Plant Uptake of Radionuclides. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 28.09.2017
- Themann D., Brunnengräber A. und Görg C. (2017) Nukleare Hinterlassenschaften im Anthropozän – Ein Plädoyer für die Erweiterung des Diskurses. Vortrag. Offene Tagung des DVPW Arbeitskreises Umweltpolitik/Global Change, Universität Potsdam (Campus Griebnitzsee, Haus 6), 06.-07.04.2017. Eingeladen

- Voss I., Bozau E. und Mengel K. (2017) Trace elements in crystallizing brines released from a deep radioactive waste disposal in rock salt. Poster. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 26.-30.09.2017. Eingeladen. Geplant
- Walther C. et al. (2017) ENTRIA: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle. Vortrag. Strahlenschutz in der Medizin, Forschung und Industrie (TÜV Süd), Marburg, 07.12.2017. Eingeladen
- Wolters R. (2017) Local, functional as well as global models – a way to analyze the long-term system behaviour of a repository for HLW built in salt rock mass. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 27.09.2017
- Wulf N. (2017) Die nukleare Endlagerung in Schweden: Akteure und ihre Positionierungen unter Bezugnahme auf Nichtwissen. Vortrag. Doktoranden-Kolloquium von Prof. Ulrich Bröckling im Rahmen des Exzellenzclusters „Kulturelle Grundlagen von Integration“, Kulturwissenschaftliches Kolleg Konstanz, 31.03.2017. Eingeladen
- Wulf N. (2017) Decision Making in Spite of Ignorance? Phenomena of Ignorance in Sweden's Radioactive Waste. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 26.09.2017. Eingeladen
- Zhao J. (2017) Multiphysical process analysis as well as system analysis concerning the post-operational system behaviour of a repository for HLW built in a clay stone formation. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 27.09.2017

8.5 Nachwuchsförderung / Aus- und Weiterbildung (interdisziplinär)

2013

- Drögemüller C. (2013) Gegenwartsanalyse der Bewertung von Entsorgungsoptionen und -strategien radioaktiver Abfälle aus Sicht kommunaler Entscheidungsträger und lokaler Bevölkerung. Institut für Radioökologie und Strahlenschutz

2014

Epkenhans I. (2014) Gegenüberstellung der Entsorgungsoptionen für hochradioaktive Reststoffe 'Oberflächenlagerung' und 'Tiefenlagerung mit Rückholoption'. Studienarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

2015

Driftmann C. (2015) Wissensmanagement bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe – Das Archiv als Informationsquelle am Beispiel Schachtanlage Asse II. Seminararbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik

Vogl C. (2015) Prognose des zeitabhängigen Carbonatisierungstiefenfortschritts unter Berücksichtigung des Rechtsregimes der deutschen Zwischenlagerung. Studienarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Wolny N. (2015) Die Rückführung der letzten CASTOR-Behälter aus den Wiederaufbereitungsanlagen in La Hague und Sellafield. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften

2016

Anton D. (2016) Der Rückbau von Leichtwasserreaktoren unter verfahrens- und strahlenschutztechnischen Gesichtspunkten. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Driftmann C. (2016) Das Endlagerungskonzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs – eine interdisziplinäre Betrachtung. Masterarbeit. Institut für Rechtswissenschaften

Krug M. (2016) Das Gesamtsystem aus Zwischenlagerbehältern und -gebäuden vor dem Hintergrund möglicher Laufzeitverlängerungen. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften

Schöpfe C. (2016) Vereinbarkeit der längerfristigen Zwischenlagerung mit dem Verursacherprinzip. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften

2017

- Albrecht-Vogelsang L. (2017) Zur Dauerhaftigkeit zementgebundener Baustoffe in einem Tiefenlager für hoch radioaktive Abfälle in Tonstein. Studienarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Drögemüller C. (2017) Gegenwartsanalyse der Bewertung von Entsorgungsoptionen und -strategien radioaktiver Abfälle aus Sicht kommunaler Entscheidungsträger und lokaler Bevölkerung. Dissertation. Forschungszentrum für Umweltpolitik
- Glasa G. (2017) Die geologischen Anforderungen im Standortauswahlverfahren – Eine Betrachtung des Begriffes bestmögliche Sicherheit für die Tiefenlagerung hochradioaktiver Reststoffe für eine Million Jahre aus rechtlicher und geologischer (geomechanischer) Perspektive. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften. In Vorbereitung
- Heek M. (2017) Management of Radioactive Waste in the Czech Republic. Bachelorarbeit. Institut für Endlagerforschung

8.6 Nachwuchsförderung / Aus- und Weiterbildung (disziplinar)

2013

- Möllhoff M. (2013) Möglichkeiten der Einflussnahme auf Schädigungsprozesse im Stahlbeton durch Oberflächenschutzsysteme für das Beispiel eines obertägigen Langzeitzwischenlagers. Studienarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Voss I. (2013) Sequentielle Spurenelementextraktion an quartären Sedimenten aus Mecklenburg-Vorpommern zur Klärung von Urankonzentrationen im Grundwasser. Masterarbeit. Institut für Endlagerforschung

2014

- Albrecht-Vogelsang L. (2014) Beispielhafte Planung der Stahlbetonhülle für eine heiße Zelle zur Behandlung hochradioaktiver Abfälle. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- De Beyer F. (2014) Zwischenlagerung hochradioaktiver Reststoffe in Deutschland, Schweiz und den Niederlanden. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

- Diehl G. (2014) Internationale Konzepte zur temporären Lagerung radioaktiver Reststoffe an oder in der Nähe der Erdoberfläche. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Ding Z. (2014) Salzgrus und sein Materialverhalten. Seminararbeit. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
- Driftmann C. (2014) Die Stilllegung der Schachanlage Asse II hinsichtlich des Strahlenschutzes. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften
- Häußler S. (2014) Hydrogeochemische Modellierung der langzeitlichen Auswirkungen der Denitrifikation auf die Grundwasserbeschaffenheit und auf das Feststoffgerüst eines Grundwasserleiters. Dissertation. Institut für Endlagerforschung
- Jantschik K. (2014) Verhalten von Versatzmaterialien in der Tiefenlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Steinsalzformationen. Studienarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Johns P. (2014) Die Schachanlage Asse II – Die Geschichte des Endlagers und das Konzept zur Rückholung der eingelagerten radioaktiven Abfälle. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften
- Josipovic N. (2014) Sachverständigen Beratung des Staates im Rahmen der Endlagersuche am Beispiel der Endlagerkommission. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften
- Keie J. (2014) Wechselwirkungen zwischen Öffentlichkeit und Betrieb der Asse – Weichenstellung durch Information und Konsens. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften
- Kim S. J. (2014) A Comparative Analysis of Nuclear Energy Policy between Germany and South Korea: Crisis Tendencies of Nuclear Energy. Dissertation. Forschungszentrum für Umweltpolitik
- Klaeßens I. (2014) Charakterisierung der europäischen und deutschen Ansätze der Endlagerfrage. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften
- Kuttig P. (2014) Monitoring- und Messtechnik in kerntechnischen Anlagen. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Lebsack E. (2014) Widerstand von Beton unter erhöhten Betriebstemperaturen. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Lei T. (2014) Entsorgung radioaktiver Abfälle in der Slowakei. Bachelorarbeit. Institut für Endlagerforschung
- Leßmann J. (2014) Zwischenlager Jülich – Die gesetzliche Legitimation eines Zwischenlagers. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften
- Marijanovic R. (2014) Versuche zur Bestimmung der Quellfähigkeit eines Bentonits im Hinblick auf die Abdichtfunktion innerhalb einer geotech-

- nischen Barriere eines Tiefenlagers. Bachelorarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Mengel L. (2014) Zum Einfluss ionisierender Strahlung auf den Beton eines Zwischenlagers für hochradioaktive Abfälle. Studienarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Möllhoff M. (2014) Bemessung eines Stahlbetontragwerks unter besonderer Berücksichtigung des Widerstands gegen Chloridkorrosion. Masterarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Qu D. (2014) Bentonit und sein Materialverhalten. Seminararbeit. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
- Schirmbeck K. (2014) Legitimation und Akzeptanz – Luhmanns Legitimitätsbegriff bezogen auf den potentiellen Atommülllagerstandort Gorleben. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften
- Schneider T. (2014) Gegenüberstellung von Stoffgesetzen für Tonstein zur Modellierung von generischen Tiefenlagermodellen mit dem Finite-Differenzen-Programm FLAC3D. Bachelorarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Seier S. (2014) Partizipation bei der Suche nach Lagern für hochradioaktive Abfälle. Eine vergleichende Studie der Suchen in Frankreich und Schweden. Masterarbeit. Forschungszentrum für Umweltpolitik
- Strätgen J. (2014) Bautechnische Konzepte zur Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen in Deutschland. Studienarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Yang Y. (2014) Standortauswahlverfahren zur Errichtung eines Endlagers für hochaktive radioaktive Stoffe in der Schweiz. Seminararbeit. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
- Zisenis J. (2014) Explosionsbelastungen und deren Auswirkungen auf Baustoffe und Bauwerke. Masterarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

2015

- Al-Saidi S. (2015) Untersuchung der Auswirkung der Teufenlage auf den Ausbau einer Infrastrukturstrecke eines generischen Tiefenlagers im Tonstein. Bachelorarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Blank S. (2015) Möglichkeiten und Einschränkungen des Monitorings von geotechnischen Schutzsystemen während der Betriebsphase eines geologischen Tiefenlagers mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit in Steinsalz. Studienarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik

- Bogdaschkin E. (2015) Behältersysteme für radioaktive Reststoffe – Anforderungen, Konzepte und Materialkennwerte. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Bork A. (2015) Entsorgung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in Deutschland – Technische Barrieren. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Eichstaedt A. (2015) Vergleich, Ermittlung und Verwendung der Erdbebenansätze für übliche Hochbauten und Kernkraftwerke. Studienarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Figueiras D. M. (2015) Auswertung des Entwurfes für ein Nationales Entsorgungsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften
- Freude M. (2015) Grenzen und Herausforderungen der Adaption internationaler Entsorgungskonzepte in Kristallingestein für Deutschland. Studienarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Gebker A. (2015) Konstruktive Aspekte der Zwischenlagerung hochradioaktiver Reststoffe in Deutschland. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Hartmann F. (2015) Bautechnische Konzepte zur Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen in Frankreich. Studienarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Jantschik K. (2015) Modellierung des zeitabhängigen Deformations-Verhaltens von Salzbeton auf der Grundlage von modelltheoretischen Ansätzen mittels des FEM-Programmsystems CODE_BRIGTH. Masterarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Kale B. (2015) Untersuchung der Auswirkung des Kriechverhaltens von Steinsalz auf die Offenhaltung von Zugangsstrecken eines Teufenlagers mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit. Bachelorarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Kalweit P. (2015) Atommüllendlagersuche und Bürgerbeteiligung. Voraussetzung für die erfolgreiche Beteiligung der Bürgerinnen und Bürger am Standortauswahlprozess einer Lagerstätte für hochradioaktiven Abfall. Masterarbeit. Forschungszentrum für Umweltpolitik
- Li Q. (2015) Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Granit. Bachelorarbeit. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
- Li X. (2015) Entwicklung der Softwareplattform RESUS: Repository Simulation, Uncertainty propagation and Sensitivity Analysis. Dissertation. Institut für Endlagerforschung
- Li X. (2015) Untersuchung der Auswirkung der Teufenlage auf den Ausbau der Infrastruktur Strecken eines generischen Tiefenlagers im Ton

- mittels FEM-Programm ANSYS. Studienarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Mannebach S. (2015) Monitoring- und Messtechnik in kerntechnischen Anlagen. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Mengel L. (2015) Simulation von Stahlbetonstrukturen unter Impactbelastung – Materialmodelle für Beton für explizite FEM mit LS-DYNA. Masterarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Peters C. (2015) Reaktionsumsätze zwischen salinaren Lösungen und äolischen Stäuben bei 80°C am Beispiel von Muskovit und Löss. Bachelorarbeit. Institut für Endlagerforschung
- Probst D. (2015) Dauerhaftigkeit und Anforderungen an eine zementbasierte Hohlraumsicherung in einem Tiefenlager für wärme-entwickelnde Abfälle in Ton/Tonstein. Studienarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Roosmann S. (2015) Atommülllagerung in der Europäischen Union. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften
- Sachse J. (2015) Dauerhaftigkeit von massigen Betonbauwerken am Beispiel von Schutzbauten. Studienarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Schliestedt S. (2015) Numerische Modellierung dreiaxialer Festigkeitsversuche an Proben aus der Fladentonsteinserie (Schacht Konrad) mit Berücksichtigung der Trennflächen. Studienarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Schloßmann P. (2015) Monitoring geotechnischer Schutzsysteme in der Tiefenlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen. Studienarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Schulz C. (2015) Fonds oder Rückstellungen im Unternehmen? Wirtschaftliche, rechtliche und politische Vor- und Nachteile für Atomkraftwerksbetreiber und Steuerzahler. Masterarbeit. Forschungszentrum für Umweltpolitik
- Turi P. (2015) Bad Banks der Energieversorgungsunternehmen. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften
- Voss I. (2015) Die Verteilung löslicher Radionuklid-relevanter Spurenelemente zwischen Salzmineralen und salinaren Lösungen. Dissertation. Institut für Endlagerforschung

2016

- Azanfack Bouzang J. (2016) Tunnelbautechnische Erfahrungen im weniger festen Sedimentgebirge / Tonsteingebirge. Bachelorarbeit. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
- Beier J. (2016) Bestimmung des Korrosionsfortschritts an mit Säure beaufschlagten Mörtelproben durch die Segmentierung mikrocomputer-tomographischer Aufnahmen. Studienarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Block S. (2016) Materialmodelle für Beton für die Simulation hochdynamischer Beanspruchungen mit LS-DYNA. Studienarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz. In Vorbereitung
- Ghofrani J. (2016) Conceptualisation and Software Development of a Simulation Environment for Probabilistic Safety Assessments of Radioactive Waste Repositories. Dissertation. Institut für Endlagerforschung.
- Göldner K. (2016) Der Prozess um die Genehmigung des Standortzwischenlagers Brunsbüttel und Konsequenzen des Genehmigungsentzugs. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften
- Habibi A. (2016) Modellierung des Radionuklidtransportes durch das Gorleben-Deckgebirge auf Grundlage des Modellierungscodes Rock-Flow und des Modellanalysecodes RESUS. Projektarbeit. Institut für Endlagerforschung
- Henkel F. (2016) Probabilistische Sicherheitsanalysen und deren Anwendbarkeit auf Langzeitzwischenlager. Studienarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Herrmann E. (2016) Rissbildung an Stahlbetonstrukturen und deren Modellierung im expliziten FEM-Programm LS-DYNA. Masterarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Hueppe K. (2016) Bautechnische Konzepte für die Zwischenlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfallstoffe im asiatischen Raum. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Jungmann M. (2016) Verteilung des Bromids im Steinsalz der Lagerstätte GSES Glückauf Sondershausen: Methodenvergleich ICP-MS und Ionenchromatographie. Bachelorarbeit. Institut für Anorganische und Analytische Chemie
- Kim S. K. (2016) Atomenergiepolitik und Anti-Atomkraft-Bewegung der Republik Korea 1978–2015. Dissertation. Forschungszentrum für Umweltpolitik
- Kock S. (2016) Die Stilllegung des Kernkraftwerks Mülheim-Kärlich. Seminararbeit. Institut für Rechtswissenschaften

- Köhler F. (2016) Sequentielle Extraktion von Iod an Bodenproben. Masterarbeit. Institut für Radioökologie und Strahlenschutz
- Kuppler S. (2016) Effekte deliberativer Ereignisse in der Endlagerpolitik. Dissertation. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
- Li Q. (2016) Rechnerische Simulation zum Tragverhalten von Endlagerhohlräumen im Opalinustongebirge. Projektarbeit. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
- Li Q. (2016) Rechnerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Endlagerhohlräumen im Opalinustongebirge anhand von mechanischen/hydromechanisch-gekoppelten (undrainierten und drainierten) Simulationen. Masterarbeit. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
- Loose C. (2016) Die Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ im 18. Deutschen Bundestag: Ein Exempel für Bürgerbeteiligung, Transparenz und Expertise bei komplexen politischen Entscheidungen?. Bachelorarbeit. Forschungszentrum für Umweltpolitik
- Meng M. (2016) „China-Mock-up“-Laborversuch: Aufbau, Zielsetzung und numerische Simulationen. Seminararbeit. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
- Otto C. (2016) Ingenieurmodelle und Einflussfaktoren für die Beschreibung von Impactvorgängen auf Stahlbetonstrukturen. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Pohlers J. (2016) Sustainability Science as an Emergence of a Third Culture within Science. Masterarbeit. Lehrstuhl für Philosophie und Ethik der Umwelt
- Reck D. (2016) Carbonatisierung von Beton am Beispiel von Langzeitversuchen. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Stute M. K. (2016) Untersuchung der Einwirkung mechanischer Anisotropie des Tonsteins auf die Interaktion aus der Betonschale und dem Gebirge mit Anwendung auf geologische Tiefenlager. Masterarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Winter K. (2016) Validierung von numerischen Simulationen der Wärmeausbreitung in einem Tiefenlager mittels CODE_BRIGHT. Studienarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Zong S. (2016) Laborative Ermittlung von 2-Phasenfluss-Parametern. Bachelorarbeit. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik

2017

- Arunakirinathan E. (2017) Die Zwischenlagerung hoch radioaktiver, Wärme entwickelnder Reststoffe als Bestandteil von Entsorgungsstrategien im asiatischen Raum. Studienarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Bojanowski R. (2017) Probabilistische Modellierung hydrogeochemischer Prozesse mit dem Code PHAST und der Softwareplattform ReSUS. Bachelorarbeit. Institut für Endlagerforschung
- Führung S. (2017) Einflussfaktoren für die experimentelle Ermittlung der Materialeigenschaften von Beton unter erhöhten Dehnraten. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz. In Vorbereitung
- Maas J. (2017) Evaluation der Mikrocomputertomographie zur Bestimmung des Hydratationsgrades von Portlandzement. Bachelorarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
- Menze J. (2017) Untersuchungen zur Korrosions- und Verschleißminderung an Lastanschlusspunkten von Großkomponenten – Untersuchung von Oberflächenbeschichtungen. Masterarbeit. Institut für Werkstoffkunde
- Olling K. (2017) Einschätzung der Anwendbarkeit von Sicherungsmitteln aus dem untertägigen Hohlraumbau bei der Tiefenlagerung hochradioaktiver Reststoffe. Studienarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik
- Ren B. (2017) Untersuchungen zur Modellierung des Deckgebirges eines Salzstocks. Studienarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik. In Vorbereitung
- Roos L. (2017) Das Standortauswahlgesetz zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle: Mögliche Konsequenzen für Zwischenlagerung und Transporte. Bachelorarbeit. Institut für Endlagerforschung
- Schaffizel T. (2017) Triaxialversuche an Steinsalz in flacher Lagerung. Studienarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik. In Vorbereitung
- Stiebeler C. (2017) Möglichkeiten des Monitorings während der Offenhaltungsphase eines Tiefenlagers in kristallinen Hartgesteinen. Bachelorarbeit. Institut für Grundbau und Bodenmechanik. In Vorbereitung
- Tawussi F. (2017) Einfluss der Speziation auf die Radionuklidaufnahme von Pflanzen. Dissertation. Institut für Radioökologie und Strahlenschutz
- Werres M. (2017) Kriterien für die Auswahl eines Standortes zur Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle im kristallinen Hartgestein in Deutschland. Bachelorarbeit. Institut für Endlagerforschung

- Zhao J. (2017) Multiphysikalische Prozessanalyse für geologische Tiefenlager in der Nachverschlussphase – Ein Beitrag zum Vergleich von Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle mit passiver Gewährleistung der langfristigen Sicherheit. Dissertation. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
- Zügner T. (2017) Vermeidung von Bewehrungskorrosion in einem Langzeitzwischenlager für hoch radioaktive Abfälle. Studienarbeit. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

2018

- Ertel J. (2018) Implementierung eines Monitoringsystems in einem zwei-sohligen Endlager. Studienarbeit. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik
- Wagner P. G. und Wilhelm J. (2018) Probabilistische Analysen von Grundwasserströmungen für räumlich verteilte Eingangsparameter. Masterarbeit. Institut für Endlagerforschung. In Vorbereitung

8.7 Öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen und Bildungsangebote

2013

- Brunnengräber A. (2013) 35 Jahre Konflikt und kein Ende? Neue Herausforderungen durch die Endlagersuche für radioaktive Abfälle. Vorlesung. Ringvorlesung „Die Umwelt als Konfliktfeld“ an der TU Dresden im Wintersemester 2013/2014, Dresden, 27.11.2013
- Brunnengräber A. (2013) Politische Ökologie und Endlager-Governance. Vortrag. Sommerschule für Promovierende der Geographie und Politikwissenschaften der Universität Kassel, FU Berlin, Universität Wien, Wietow, 19.08.2013
- Brunnengräber A., Ziehm C. und Stay J. (2013) Spaltet die Endlagersuche die Umweltbewegung? Diskussion. Das Bewegungsgespräch, Berlin, 11.09.2013
- Brunnengräber A. und Mez L. (2013) Fachgespräch mit Sylvia Kotting-Uhl. Fachgespräch. Sitzung Ausschuss für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, 27.11.2013
- Drögemüller C. (2013) Gegenwartsanalyse der Bewertung von Entsorgungsoptionen und -strategien radioaktiver Abfälle aus Sicht kom-

- munaler Entscheidungsträger und lokaler Bevölkerung. Vortrag. Sommerschule für Promovierende der Geographie und Politikwissenschaften der Universität Kassel, FU Berlin, Universität Wien, Wietow, 17.-23.08.2013
- Grunwald A. und Hocke P. (2013) „Es kommt auf eine gerechte Verteilung der Lasten an.“ Karlsruher Wissenschaftler helfen der Politik bei der Suche nach einem Endlager für hoch radioaktiven Abfall. Interview in den Badischen Neuesten Nachrichten. Interview
- Häfner D. (2013) Das ENTRIA-Projekt und Betroffenheit(en) im Umfeld kerntechnischer Anlagen. Vortrag. Workshop für Studierende „Bürgerforum Endlagerung“, Cottbus, 13.-14.12.2013
- Häfner D. (2013) Multi-Level-Governance im Bereich Endlagerung radioaktiver Reststoffe. Vorlesung. Lehrveranstaltung „Sozialwissenschaftliche Energiefragen“, Cottbus, 19.11.2013
- Häfner D. (2013) Neue Wege für die Endlagersuche in Deutschland: Das ENTRIA Projekt. Vortrag. 3. Atommüllkonferenz, Kassel, 31.08.2013
- Hocke P. (2013) New Governance als Konzept zukünftiger Endlagerpolitik überholt? Bürgerbeteiligung und modernes Regieren. Vorlesung. Ringvorlesung Kernenergie und Brennstoffkreislauf an der Leibniz Universität Hannover im Wintersemester 2013/2014, Hannover, 17.12.2013
- Hocke P. (2013) Gelbe Fässer und die Komplexität bei der Lösung vertrackter Probleme: Entsorgung in Deutschland und anderswo. Vorlesung. Mittagsvorlesung im Studiengang Visuelle Kommunikation der Hochschule Pforzheim, Pforzheim, 06.11.2013
- Hocke P. (2013) Interview zur „Konflikte und Entscheidungsblockaden rund um die nukleare Entsorgung“ im KIT-Radio. Interview
- Kotting-Uhl S., Schönberger U., Smeddinck U., Hocke P. und Lux K.-H. (2013) Entsorgung radioaktiver Reststoffe: Standortauswahlgesetz – und wie weiter? ENTRIA-Podiumsdiskussion
- Kuppler S. (2013) Public participation in nuclear waste management in Germany and Switzerland – research process and methodology of an empirical case study. Vortrag. Vortrag an der Karlsruhochschule Karlsruhe, Karlsruhe, 14.03.2013
- Mez L. (2013) Vorstellung der Forschungsplattform Entsorgungsoptionen für radioaktive Reststoffe: Interdisziplinäre Analysen und Entwicklung von Bewertungsgrundlagen (ENTRIA). Vortrag. Vorträge am Ostbahnhof Dannenberg, Dannenberg, 18.08.2013
- Mez L. (2013) Nuclear Power and Climate Protection Policy. Vortrag. Vortrag vor einer Besuchergruppe von japanischen Energiejuristen, Berlin, 22.05.2013

- Neumann W. (2013) Strahlenschutz bei Transport und Zwischenlagerung radioaktiver Stoffe. Vorlesung. Kompaktvorlesung „Strahlenschutz“ im Wintersemester 2013/2014, Magdeburg-Stendal, WS 2013/2014
- Plischke E., Riemann M. und Häfner D. (2013) Wie könnte eine Bürgerbeteiligung fair gestaltet werden? Welche der verschiedenen Optionen zum Umgang mit radioaktiven Reststoffen fänden Studierende akzeptabel? Workshop. Workshop für Studierende „Bürgerforum Endlagerung“, Cottbus, 13.-14.12.2013
- Röhlig K.-J. (2013) Gespräch zu „Into Eternity“ (Film). Diskussion. Green Visions Filmreihe, München, 11.04.2013
- Röhlig K.-J., Plischke E., Riemann M. und Chaudry S. (2013) Wohin mit unseren radioaktiven Abfällen? Workshop. Ferienakademie „Nur noch kurz die Welt retten. Energiewende konkret“ des Cusanuswerkes 2013, Papenburg, 03.-05.09.2013
- Smeddinck U. (2013) Übergreifende Aspekte und Grundzüge des Atomrechts. Vorlesung. Ringvorlesung Kernenergie und Brennstoffkreislauf an der Leibniz Universität Hannover im Wintersemester 2013/2014, Hannover, 10.12.2013
- Smeddinck U. (2013) Abfall, Atom Müll, Elektroschrott: Was tun wir, wenn wir entsorgen? Vorlesung. Ringvorlesung „Was tun wir, wenn wir arbeiten?“ an der TU Braunschweig im Wintersemester 2013/2014, Braunschweig, 25.11.2013
- Smeddinck U. und Chaudry S. (2013) Elemente des neuen Standortauswahlgesetzes. Vortrag. „Das neue Endlagersuchgesetz aus rechts- und geowissenschaftlicher Sicht. Warum z.B. die Thekenberge nicht als Endlager in Frage kommen.“ – Veranstaltung am Fachbereich Verwaltungswissenschaften der Hochschule Harz, Halberstadt, 04.12.2013
- Stahlmann J. (2013) Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle – eine geotechnisch lösbare Aufgabe? Vortrag. 18. Alumni-Gespräch des Alumni-Bau Carolo Wilhemina e.V., Braunschweig, 31.10.2013
- Stahlmann J., Bollingerfehr W. und Noseck U. (2013) Weiterbildung Tiefenlagerung. Vorlesung. Weiterbildung „Tiefenlagerung“ im Wintersemester 2013/2014, Braunschweig, WS 2013/2014
- Walther C. (2013) Vorstellung des interdisziplinären Projekts ENTRIA. Vortrag. Heraeus Summer School „Ionising Radiation and Protection of Man“, Bad Honnef, 12.-23.08.2013
- Walther C. (2013) Alljährlich Vorträge und Experimente zum Thema Strahlenschutz. Veranstaltungen mit Schulklassen
- Walther C. (2013) Concepts in radioactive waste management. Vortrag. Heraeus Summer School „Ionising Radiation and Protection of Man“, Bad Honnef, 11.08.2013

- Walther C. (2013) Wohin mit den radioaktiven Abfällen? – ein Neustart? Vortrag. Saturday Morning Lecture an der Leibniz Universität Hannover, Hannover, 04.05.2013
- Walther C. (2013) Vorlesung. Ringvorlesung Kernenergie und Brennstoffkreislauf an der Leibniz Universität Hannover im Wintersemester 2013/2014, Hannover, WS 2013/2014

2014

- Blätter C., Braun F., Ott K., Sombetzki J. und Riemann M. (2014) Mensch. Technik. Gesellschaft. Workshop. Workshop zur Philosophie der Technik für ENTRIA-Mitarbeiter und Studierende der CAU Kiel, Kiel, 12.-13.06.2014
- Chaudry S. und Plischke E. (2014) ENTRIA: Ein interdisziplinäres Verbundprojekt zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Poster. Jahresversammlung der TU Clausthal, Clausthal, 18.07.2014
- Hocke P. (2014) Nukleare Altlasten. Die Suche nach einem nuklearen Endlager unter schwierigen Randbedingungen. Vorlesung. Ringvorlesung an der Universität für Bodenkultur im Wintersemester 2013/2014, Wien, Österreich, 16.01.2014
- Hocke P. (2014) Zur Struktur der Kommissionsarbeit: Umgang mit Konflikten und Nicht-Wissen. Vortrag. Workshop der Grüne-Landtags-Fraktion „Niedersachsens Erwartungen an die Endlagerkommission“, Hannover, 21.02.2014
- Hocke P., Kuppler S., Mbah M. und Wulf N. (2014) Vorträge bei der ENTRIA-ITAS-Summerschool 2014. Vortrag. ITAS-ENTRIA-Summerschool 2014, Karlsruhe, 30.06.-04.07.2014
- König C., Walther C. und Smeddinck U. (2014) Critical evaluation of German regulatory specifications for calculating radiological exposure. Poster. Heraeus Summer School „Ionising Radiation and Protection of Man“, Bad Honnef, 11.-22.08.2014
- Kuppler S. (2014) Merkpunkte für die Beurteilung komplexer Verfahren wie des Sachplans und hochwertiger Bürgerbeteiligung. Vortrag. Regionalkonferenz Zürich Nordost, Zürich, Schweiz, 10.09.2014
- Kuppler S. (2014) Einblick in die wissenschaftliche Debatte zu notwendigen Voraussetzungen für ein hochwertiges Verfahren bei der Endlager-suche. Impulsvortrag. Veranstaltung II „Öffentliche Beteiligung – wie kann Glaubwürdigkeit wachsen?“ aus der Veranstaltungsreihe „Bis in alle Ewigkeit...“, Hannover, 28.07.2014

- Li X., Ghofrani J., Plischke E. und Röhlig K.-J. (2014) Weiterentwicklung der Softwareplattform RESUS: (Repository Simulation, Uncertainty Propagation and Sensitivity Analysis). Poster. Jahresversammlung der TU Clausthal, Clausthal, 18.07.2014
- Neumann W. (2014) Strahlenschutz bei Transport und Zwischenlagerung radioaktiver Stoffe. Vorlesung. Kompaktvorlesung „Strahlenschutz“ im Wintersemester 2014/2015, Magdeburg-Stendal, WS 2014/2015
- Neumann W. (2014) Bewertung der aktuellen Endlagersuche und der Kommission Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle. Vortrag. Kreistag Lüchow-Dannenberg, Lüchow, 28.05.2014
- Ott K. (2014) Ethische Normen und andere philosophische Überlegungen bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Vorlesung. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2014/2015, Hannover, WS 2014/2015
- Pang B., Saurí Suárez H., Becker F. und Geckeis H. (2014) Individual dosimetry in final disposal repository of nuclear waste. Poster. Heraeus Summer School „Ionising Radiation and Protection of Man“, Bad Honnef, 11.-22.08.2014
- Plischke E. (2014) Global Sensitivity Analysis on Given Data. Vortrag. SAMO Summer School, Ranco, Italien, 26.06.2014
- Pohlers J., Riemann M. und Schreurs M. A. (2014) Schulung „Kleingruppenmoderation“ der IFOK GmbH. Schulung. Schulung „Kleingruppenmoderation“ der IFOK GmbH, Berlin, 24.11.2014
- Riemann M. (2014) Atommüll und Demokratie – eine liaison dangereuse. Vorlesung. Modul Bürgerbeteiligung der MSE (TU München), München, 31.01.2014
- Riemann M. (2014) Umweltethik und die Entsorgung radioaktiver Abfälle. Diskussion. Diskussion mit Schülern der 11. Klasse am Gymnasium Tutzing, Tutzing, 03.02.2014
- Rippe K. P. (2014) Verantwortung für künftige Generationen. Vortrag. „Intergenerationelle Gerechtigkeit“ Veranstaltung im Bundesamt für Umwelt, Bern, 2014
- Röhlig K.-J. (2014) Endlagerung radioaktiver Abfälle. Vorlesung. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2014/2015, Hannover
- Röhlig K.-J. (2014) Wohin mit dem Atommüll? Vortrag. Akademieabend im Rahmen des Klimanetzwerkes Papenburg, Papenburg, 08.05.2014
- Röhlig K.-J. (2014) Rückholbarkeit. Vortrag. 4. Sitzung Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß §3 Standortauswahlgesetz, Berlin, 22.09.2014

- Röhlig K.-J. (2014) Standortauswahlkriterien, Möglichkeiten der Fehlerkorrektur und Alternativen zur Endlagerung in tiefen geologischen Formationen aus Sicht der NEA/IGSC. Anhörung. 6. Sitzung Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß §3 Standortauswahlgesetz, Berlin, 05.12.2014
- Röhlig K.-J. (2014) Vorstellung des interdisziplinären Projekts ENTRIA. Vortrag. 4. Sitzung Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß §3 Standortauswahlgesetz, Berlin, 22.09.2014
- Schreurs M. A., Brunnengräber A., Di Nucci M. R. und Mez L. (2014) Endlager-Governance im internationalen Vergleich. Anhörung. 6. Sitzung Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß §3 Standortauswahlgesetz, Berlin, 05.12.2014
- Semper F. (2014) Umweltrecht. Vorlesung. Vorlesung „Umweltrecht“ im Wintersemester 2014/2015, Braunschweig, WS 2014/2015
- Smeddinck U. (2014) Das Standortauswahlgesetz – Überblick und ausgewählte Schwerpunkte. Vorlesung. Ringvorlesung Kernenergie und Brennstoffkreislauf an der Leibniz Universität Hannover im Wintersemester 2013/2014, Hannover, 07.01.2014
- Smeddinck U. (2014) Technikrecht. Vorlesung. Vorlesung „Technikrecht“ im Wintersemester 2014/2015, Braunschweig, WS 2014/2015
- Smeddinck U. (2014) Der europäische Rechtsrahmen für die Atomentorgung: Welche Vorgaben bestehen? Welche Vorgaben sind erforderlich? Vortrag. Auftaktveranstaltung „Bis in alle Ewigkeit...“, Hannover, 23.06.2014
- Smeddinck U. (2014) Zur Evaluierung des StandAG. Anhörung. 5. Sitzung Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß §3 Standortauswahlgesetz, Berlin, 03.11.2014
- Smeddinck U., Köhnke D., Léon Vargas R. P., Mintzlaff V., Reichardt M., Franz M. und Roßegger U. (2014) Vorlesung. Seminar „Atomentorgung“ im Sommersemester 2014, Braunschweig
- Stahlmann J., Bollingerfehr W. und Noseck U. (2014) Weiterbildung Tiefenlagerung. Vorlesung. Weiterbildung „Tiefenlagerung“ im Wintersemester 2014/2015, Braunschweig, WS 2014/2015
- Voss I., Schmidt K., Bozau E. und Mengel K. (2014) Numerische Modellierung thermischer, hydraulischer und chemischer Prozesse auf Basis einer Software-Plattform zur Langzeitsicherheitsanalyse. Poster. Jahresversammlung der TU Clausthal, Clausthal, 18.07.2014
- Walther C. (2014) From Fukushima to the Disposal of radioactive Waste in Germany – Radioecology at the IRS. Vortrag. Kolloquium der Universität Jena, Jena, 28.05.2014

- Walther C. (2014) From Fukushima to the Disposal of radioactive Waste in Germany – Radioecology at the IRS. Vortrag. PSI Kolloquium, Villingen, Schweiz, 07.10.2014
- Walther C. (2014) From Fukushima to the Disposal of radioactive Waste in Germany – Radioecology at the IRS. Vortrag. Kolloquium der Universität Helsinki, Helsinki, Finnland, 7.10.2014
- Walther C. (2014) Entsorgung radioaktiver Abfälle – Radioökologie und Strahlenschutz am IRS. Vortrag. Kolloquium der Forschungsinitiative FI:GEO, Hannover, 10.11.2014
- Walther C. (2014) Vorstellung des interdisziplinären Projekts ENTRIA. Vortrag. Heraeus Summer School „Ionising Radiation and Protection of Man“, Bad Honnef, 11.-22.08.2014
- Walther C. (2014) Vorlesung. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2014/2015, Hannover
- Walther C. (2014) Migration soil – water interface after liquid releases Future Exposures from Contaminated Sites. Vortrag. Heraeus Summer School „Ionising Radiation and Protection of Man“, Bad Honnef, 16.08.2014
- Walther C. (2014) Entsorgungsoptionen für hochradioaktiven Abfall – das interdisziplinäre Projekt ENTRIA. Vortrag. Die Nacht, die Wissen schafft, Hannover, 15.11.2014
- Walther C., Brandt E. und Röhlig K.-J. (2014) ENTRIA-Memorandum. Pressekonzferenz
- Walther C. und Smeddinck U. (2014) Schüler-Workshop AG 4 „Wissenschaft“. Diskussion. Schülertagung „Endlagersuche“ der Evangelischen Akademie, Loccum, 30.09.2014

2015

- Brunnengräber A. (2015) Experten Round-Table: Konflikte im Standortauswahlverfahren. Podiumsdiskussion. Konflikte im Standortauswahlverfahren, Berlin, 08.12.2015
- Brunnengräber A. (2015) Wie mit Klimaskeptikern umgehen? Vortrag. Tagung „Wenn Konzerne den Protest managen“, Berlin, 26.09.2015
- Chaudry S. (2015) Tiefenlagerung radioaktiver Reststoffe. Vortrag. Studienangebot der Forschungsplattform ENTRIA im Rahmen des Masterstudiengangs Umweltrecht, Universität Kassel, 09.06.2015
- Chaudry S. (2015) Tiefenlagerung radioaktiver Reststoffe. Vortrag. ENTRIA-Bürgerforum des Phil. Sem., Wittenberg, 31.01.2015

- Eckhardt A. (2015) Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Anhörung. 17. Sitzung Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß §3 Standortauswahlgesetz, Berlin, 19.11.2015
- Faßbender K. (2015) Rezension „Timo Hohmuth: Die atomrechtspolitische Entwicklung in Deutschland seit 1980. Darstellung, Analyse, Materialien“. Rezension zu: Die atomrechtspolitische Entwicklung in Deutschland seit 1980. Darstellung, Analyse, Materialien
- Häfner D. (2015) Diskussion zur Filmvorführung. Podiumsdiskussion. „Die Reise zum sichersten Ort der Erde“, Hoyerswerda, 20.04.2015
- Häfner D. (2015) Herbert Marcuse, Ecological Transition and Nuclear Waste Governance. Vortrag. Expertengespräch an der Beijing University, Beijing, 14.09.2015
- Hocke P. (2015) Endlager-Politik am Scheideweg? Herausforderungen für Expertenkommunikation und Öffentlichkeit. Vorlesung. Ringvorlesung „Umwelt“ an der TU München im Wintersemester 2014/2015, München, 14.01.2015
- Hocke P. (2015) Governance und / oder Partizipation? Trägt Governance als Analysekonzept für die aktuelle Endlagerpolitik? Vorlesung. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2014/2015, Hannover, 27.01.2015
- Hocke P. (2015) Endlager-Politik als analytisches Problem? Herausforderungen für Expertenkommunikation und Ethik. Vorlesung. Oberseminar „Technikfolgenabschätzung“ an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften am KIT, Karlsruhe, 03.07.2015
- Hocke P. (2015) Socio-ethic Aspects of Radwaste Management Strategies: Long-term Interim Storage vs. Final Disposal. Vortrag. Intersemester-Kurs „Nuclear Waste Management“ im Rahmen des Projekts GENTLE, Karlsruhe, 29.06–03.07.2015
- Hocke P. (2015) Strukturelle Handicaps und Ansatzpunkte für ein qualitativ hochwertiges Standortauswahl-Verfahren. Impulsvortrag. Veranstaltung VI „Der Umgang mit dem Atommüll: Deutschland – ein hoffnungsloser Fall?“ aus der Veranstaltungsreihe „Bis in alle Ewigkeit...“, Hannover, 27.04.2015
- Hocke P. (2015) Nukleare Entsorgung und Technikfolgenabschätzung in einem Technikkonflikt. Vortrag. ITAS-ENTRIA-Summerschool 2015, Karlsruhe, 15.-19.06.2015
- Köhnke D. (2015) Oberflächenlagerung hochradioaktiver Reststoffe. Vortrag. Bürgerforum „Wohin mit unserem Atommüll?“, Lutherstadt Wittenberg, 31.01.2015

- König W., Röhlig K.-J., Budelmann H. und Smeddinck U. (2015) Wie werden wir die Atomkraftwerke los? Podiumsdiskussion. NDR Info. Logo – Wissenschaft aus Braunschweig: Wie werden wir die Atomkraftwerke los?, Braunschweig, 03.02.2015
- Kuppler S. (2015) Was ist hochradioaktiver Abfall? Eine Governance-Vorlesung. Vortrag. Studienangebot der Forschungsplattform ENTRIA im Rahmen des Masterstudiengangs Umweltrecht, Universität Kassel, 09.06.2015
- Mbah M. (2015) Participation – challenges for democratic decisionmaking. Vortrag. KIT-ITAS-Doktorandenbegleitprogramm, Karlsruhe, 13.10.2015
- Mbah M. und Wulf N. (2015) Einführung in die Sozialwissenschaften am Beispiel von ITAS-Arbeiten. Vortrag. ITAS-ENTRIA-Summerschool 2015, Karlsruhe, 15.-19.06.2015
- Mez L. (2015) Nuclear Power & Climate Protection Policy. Vortrag. TERI Summer Class, Berlin, 03.06.2015
- Mez L. (2015) Zur Geschichte der Endlagerung in Deutschland. Vortrag. Bürgerforum „Wohin mit unserem Atommüll?“, Lutherstadt Wittenberg, 01.02.2015
- Mez L. (2015) Conflict management in environmental issues: Nuclear power in Europe. Vortrag. European Fall Academy 2015 „Human Rights, Migration, Conflict Management – European Perspectives and Public Policy“, Otzenhausen, 10.11.2015
- Mintzlaff V. (2015) Geochemische Aspekte der Rückholbarkeit von radioaktiven Reststoffen. Vortrag. Vortragsreihe „Beiträge zur Geotechnik“ der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle, 26.11.2015
- Neumann W. (2015) Strahlenschutz bei Transport und Zwischenlagerung radioaktiver Stoffe. Vorlesung. Kompaktvorlesung „Strahlenschutz“ im Wintersemester 2015/2016, Magdeburg-Stendal, WS 2015/2016
- Ott K., Pohlert J. und Riemann M. (2015) Wohin mit unserem Atommüll. Bürgerforum. Bürgerforum „Wohin mit unserem Atommüll?“, Lutherstadt Wittenberg, 30.01–01.02.2015
- Reichardt M. (2015) Oberflächenlagerung hochradioaktiver Reststoffe. Vortrag. Studienangebot der Forschungsplattform ENTRIA im Rahmen des Masterstudiengangs Umweltrecht, Universität Kassel, 09.06.2015
- Riemann M. (2015) Warum Philosophie in der Entsorgungsforschung? Vortrag. Studienangebot der Forschungsplattform ENTRIA im Rahmen des Masterstudiengangs Umweltrecht, Universität Kassel, 09.06.2015
- Riemann M. (2015) Beteiligung von Nicht-Betroffenen – Ein Bürgerforum zur Entsorgung radioaktiver Abfälle. Vorlesung. Modul Bürgerbeteiligung der MSE (TU München), München, 10.07.2015

- Riemann M. (2015) Ethische Normen und andere philosophische Überlegungen bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Vorlesung. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2015/2016, Hannover, WS 2015/2016
- Rippe K. P. (2015) Nukleare Abfälle aus Sicht der Risikoethik. Vortrag. Vortrag an der Kantonsschule Hottingen, Bern, 09.04.2015
- Röhlig K.-J. (2015) Entsorgung radioaktiver Abfälle: Die Situation in Deutschland, das Standortauswahlgesetz und das Forschungsprojekt ENTRIA. Vortrag. 36. Harzer Mineralienseminar, Clausthal-Zellerfeld, 21.09.2015
- Röhlig K.-J. (2015) Diskussion zur Filmvorführung „Die Reise zum sichersten Ort der Erde“. Podiumsdiskussion. European Researchers' Night, Braunschweig, 21.09.2015
- Röhlig K.-J. (2015) Endlagerung radioaktiver Abfälle. Vorlesung. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2015/2016, Hannover
- Röhlig K.-J. (2015) Sicherheitsanforderungen des BMU 2010. Anhörung. 17. Sitzung Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß §3 Standortauswahlgesetz, Berlin, 19.11.2015
- Saurí Suárez H. (2015) Entwicklung von Verfahren für individuelle Dosimetrie für Beschäftigte in Entsorgungsanlagen: Strahlenfeld in einer Steinsalzstrecke. Vorlesung. Seminar am Institut für Neutronenphysik und Reaktorsicherheit (KIT), Karlsruhe, 28.04.2015
- Saurí Suárez H. (2015) Entwicklung von Verfahren für individuelle Dosimetrie für Beschäftigte in Entsorgungsanlagen. Vorlesung. Seminar am Institut für Neutronenphysik und Reaktorsicherheit (KIT), Karlsruhe, 07.12.2015
- Semper F. (2015) Umweltrecht. Vorlesung. Vorlesung „Umweltrecht“ im Sommersemester 2015, Braunschweig, SS 2015
- Semper F. (2015) Umweltrecht. Vorlesung. Vorlesung „Umweltrecht“ im Wintersemester 2015/2016, Braunschweig, WS 2015/2016
- Smeddinck U. (2015) Das Standortauswahlgesetz – Überblick und ausgewählte Schwerpunkte. Vorlesung. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2014/2015, Hannover, 20.01.2015
- Smeddinck U. (2015) Das Standortauswahlgesetz. Vorlesung. Ringvorlesung „Radioaktive Abfälle und gesetzliche Regelungen“ im Sommersemester 2015, Clausthal-Zellerfeld, 20.05.2015
- Smeddinck U. (2015) Das Standortauswahlgesetz. Vortrag. Studienangebot der Forschungsplattform ENTRIA im Rahmen des Masterstudiengangs Umweltrecht, Universität Kassel, 09.06.2015

- Smeddinck U. (2015) Das Standortauswahlgesetz. Vortrag. Bürgerforum „Wohin mit unserem Atommüll?“, Lutherstadt Wittenberg, 30.01.2015
- Smeddinck U. (2015) Technikrecht. Vorlesung. Vorlesung „Technikrecht“ im Sommersemester 2015, Braunschweig, SS 2015
- Smeddinck U. (2015) Technikrecht. Vorlesung. Vorlesung „Technikrecht“ im Wintersemester 2015/2016, Braunschweig, WS 2015/2016
- Smeddinck U., Köhnke D., Léon Vargas R. P., Mintzlaff V., Reichardt M. und Semper F. (2015) Vorlesung. Seminar „Entsorgung radioaktiver Reststoffe“ im Sommersemester 2015, Braunschweig
- Stahlmann J. (2015) Soll der Atommüll rückholbar sein? Geologische und Geotechnische Aspekte der Rückholbarkeit. Podiumsdiskussion. Podiumsdiskussion „Soll der Atommüll rückholbar sein? Geologische und Geotechnische Aspekte der Rückholbarkeit“, Berlin, 24.02.2015
- Stahlmann J., Bollingerfehr W. und Noseck U. (2015) Weiterbildung Tiefenlagerung. Vorlesung. Weiterbildung „Tiefenlagerung“ im Wintersemester 2015/2016, Braunschweig, WS 2015/2016
- Walther C. (2015) Radioecology of long lived radionuclides at contaminated areas and risk assessment of disposal options for high level radioactive waste. Vortrag. Seminar im Cluster Research Laboratory, Chiba, Japan, 12.05.2015
- Walther C. (2015) Risk assessment of disposal options for high level radioactive waste and radioecology of long lived radionuclides at contaminated areas. Vorlesung. Seminar an der Universität von Kyoto, Kyoto, Japan, 15.05.2015
- Walther C. (2015) Vorlesung. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2015/2016, Hannover
- Walther C. (2015) Vorstellung des interdisziplinären Projekts ENTRIA. Vortrag. Heraeus Summer School „Ionising Radiation and Protection of Man“ 2015, Bad Honnef, 03.-14.08.2015
- Walther C. (2015) Concepts in radioactive waste management. Vortrag. Heraeus Summer School „Ionising Radiation and Protection of Man“ 2015, Bad Honnef, 13.08.2015
- Walther C. (2015) Vorstellung des interdisziplinären Projekts ENTRIA – Radiologische Aspekte. Vortrag. Sitzung Strahlenschutz Kommission A3, Bonn, 28.05.2015
- Wenzel S., Wimmer H., Donat M., Grunwald A., Budelmann H., Röhlig K.-J. und Walther C. (2015) Unterwegs zum Endlager. Podiumsdiskussion. Technik-Salon, Hannover, 11.02.2015

2016

- Brunnengräber A. (2016) Sozial-ökologische Herausforderungen im Zeitalter des Anthropozän – Folgewirkung menschlichen Handelns. Vortrag. Tagung „Endlagersuche. Wie steht es um die Vorbereitung der Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland“ der Evangelischen Akademie, Loccum, 03.-05.06.2016
- Brunnengräber A. (2016) Die Endlagerung radioaktiver Reststoffe – ein wicked problem im nationalen und internationalen Kontext. Vortrag. Sitzung der DGAP Projektgruppe „Nichtverbreitung von Massenvernichtungswaffen und sensitiven Technologien“, Berlin, 02.06.2016
- Eckhardt A. (2016) Risiken der Kernenergie – Einschätzung und Beurteilung. Vorlesung. Seminar „Ausstieg aus der Kernenergie? – Deutschland und Frankreich im Vergleich“ am Lehrstuhl für Wissenschaftsjournalismus der Universität Dortmund, Dortmund, 16.02.2016
- Grunwald A. (2016) Sicherheit für eine Million Jahre – Auf dem Weg zu einem Endlager für hoch radioaktive Abfälle. Vortrag. Wissenschaftlicher Abendvortrag im Magnus Haus, Berlin, 08.11.2016
- Grunwald A. und Hocke P. (2016) Ethische Aspekte der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle. Vorlesung. Seminar „Ethische Aspekte der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle“, Karlsruhe, 25.-27.07.2016
- Hassel T. (2016) Dismantling of Nuclear Power Plants. Vorlesung. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2015/2016, Hannover, 21.12.2016
- Hocke P. (2016) Nach zwei Jahren Arbeit hat die Endlagerkommission ihren Abschlussbereich übergeben. Was genau dieser Abschlussbericht enthält, darüber klärt Dr. Peter Hocke-Bergler auf. Interview. Interview für Baden TV Aktuell, Karlsruhe, 06.07.2016
- Hocke P. (2016) Forschung und Entwicklung der nuklearen Entsorgungsforschung in Deutschland. Status quo und Anforderungen. Impulsvortrag. „Ross trifft Bär“ – Stefan Wenzel diskutiert zum Abschlussbericht Atommüllendlager, Berlin, 21.09.2016
- Köhnke D. (2016) Langfristige Oberflächenlagerung hochradioaktiver Reststoffe. Vortrag. Veranstaltung IX „Verlängerte Zwischenlagerzeiten? Konsequenzen für die nächsten Jahrzehnte“ aus der Veranstaltungsreihe „Bis in alle Ewigkeit...“, Hannover, 29.02.2016
- Köhnke D. (2016) Internationale Praxis der Zwischenlagerung und Forschung zur langfristigen Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle. Vortrag. Fachtagung „Probleme bei der Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle“, Würzburg, 25.11.2016
- Kuppler S. und Hocke P. (2016) Governance als Analysekonzept für die aktuelle Endlagerpolitik? Ein Problemaufriss. Vorlesung. Ringvorlesung

- „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2015/2016, Hannover, 02.02.2016
- Mez L. (2016) 30 Years Nuclear Energy Research at the FFU. Vortrag. Governing Nuclear Waste – Conflicts, Participation and Acceptability, Berlin, 20.09.2016
- Mez L., Schönberger U., Miersch M. und Kanitz S. (2016) Stefan Wenzel diskutiert zum Abschlussbericht Atommüllendlager. Podiumsdiskussion. „Ross trifft Bär“ – Stefan Wenzel diskutiert zum Abschlussbericht Atommüllendlager, Berlin, 21.09.2016
- Mez L. und Brunnengräber A. (2016) Nuclear Power and Nuclear Waste Governance – a wicked problem. Vortrag. Zukunft der Umweltpolitik – Umweltpolitik der Zukunft 30 Jahre Forschungszentrum für Umweltpolitik, Berlin, 26.04.2016
- Neumann W. (2016) Strahlenschutz bei Transport und Zwischenlagerung radioaktiver Stoffe. Vorlesung. Kompaktvorlesung „Strahlenschutz“ im Wintersemester 2016/2017, Magdeburg-Stendal, WS 2016/2017
- Neumann W. (2016) Zwischen Laufzeitende und Endlagerung. Vortrag. Tagung „Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und hochradioaktiver Abfälle“ Evangelische Akademie, Loccum, 04.06.2016
- Neumann W. (2016) Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und hoch radioaktiver Abfälle. Vortrag. Veranstaltung IX „Verlängerte Zwischenlagerzeiten? Konsequenzen für die nächsten Jahrzehnte“ aus der Veranstaltungsreihe „Bis in alle Ewigkeit...“, Hannover, 29.02.2016
- Plischke E. (2016) Moment-independent methods. Vortrag. 9. Summer School on Sensitivity Analysis of Model Output (SAMO 2016), Anacapri, Italien, 06.06.2016
- Plischke E. (2016) Spectral methods. Vortrag. 9. Summer School on Sensitivity Analysis of Model Output (SAMO 2016), Anacapri, Italien, 06.06.2016
- Riemann M. (2016) Ethische Normen und andere philosophische Überlegungen bei der Entsorgung radioaktiver Reststoffe. Vorlesung. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2016/2017, Hannover, WS 2016/2017
- Röhlig K.-J. (2016) Scenario Analysis. Vortrag. DPG/ENTRIA Summer Physics School on „Radiation Exposure and Disposal Options for Nuclear Waste“, Bad Honnef, 10.08.2016
- Röhlig K.-J. (2016) Safety Assessment and Safety Case: Confidence building in the presence of uncertainties. Vortrag. 2. Petrus-OPERA PhD and Early-Stage Researchers Conference 2016, Delft, Niederlande, 01.07.2016

- Semper F. (2016) Legal development in reference to EU basic specification. Vortrag. DPG/ENTRIA Summer Physics School on „Radiation Exposure and Disposal Options for Nuclear Waste“, Bad Honnef, 15.08.2016
- Smeddinck U. (2016) Rapport zu Durchführung und Ergebnissen. Vortrag. 10th National Workshop of the OECD Nuclear Energy Agency's Forum on Stakeholder Confidence „Bridging Gaps – Developing Sustainable Intergenerational Decision-Making in Radioactive Waste Management“, Bern, Schweiz, 09.09.2016
- Walther C. (2016) Wie lange wird der Atomausstieg wirklich dauern? Vortrag. Die Nacht, die Wissen schafft, Hannover, 12.11.2016
- Walther C. (2016) Vorlesung. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2016/2017, Hannover
- Walther C. (2016) Chemistry of long-lived radionuclides relevant for waste disposal. Vortrag. Heraeus Summer School „Ionising Radiation and Protection of Man“, Bad Honnef, 06.-08.08.2016
- Wolters R. (2016) Repositories for Heat-generating Waste in Deep Geological Formations – Influence on Underground Fluiddynamic Processes. Vortrag. DPG/ENTRIA Summer Physics School on „Radiation Exposure and Disposal Options for Nuclear Waste“, Bad Honnef, 11.08.2016
- Wulf N. (2016) Die schwedische Suche nach einem Endlagerstandort: Artikulationen von Wissen und Nichtwissen. Vortrag. INSIST-Nachwuchstagung „Schafft Wissen“, München, 08.10.2016

2017

- Brunnengräber A. und Häfner D. (2017) Aufarbeitung der Vergangenheit – Auseinandersetzungen um die Nutzung der Kernenergie und insbesondere den Umgang mit hochradioaktiven Abfällen. Workshop. FFU Workshop: Aufarbeitung der Vergangenheit – Auseinandersetzungen um die Nutzung der Kernenergie und insbesondere den Umgang mit hochradioaktiven Abfällen, Berlin, 27.-28.10.2017
- Chaudry S. (2017) Gegenrede: „Einlagerung in tiefe geologische Formationen mit Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholbarkeit“. Vortrag. Radioaktiver Abfall – was nun?, Braunschweig, 30.09.2017
- Drögemüller C. und Kuppler S. (2017) Neustart in der Endlagersuche. Ergebnisse der Governance-Forschung. Vortrag. Radioaktiver Abfall – was nun?, Braunschweig, 30.09.2017
- Emanuel F. (2017) Rezension zu: Ulrich Smeddinck (Hrsg.): Standortauswahlgesetz (StandAG), Kommentar. Rezension zu: StandAG. Standortauswahlgesetz. Kommentar

- Hocke P. und Kuppler S. (2017) Governance, Staatlichkeit und Gegenwartsanalyse angesichts der aktuellen Endlagerpolitik: ein Problemaufriss. Technische Aspekte und gesellschaftlicher Diskurs. Vorlesung. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2016/2017, Hannover, 17.01.2017
- Kuppler S. (2017) Effekte deliberativer Ereignisse in der Endlagerpolitik. Deutschland und die Schweiz im Vergleich (2001–2010). Vortrag. Festvortrag im Rahmen des Forschungsbereichs Wissen am ITAS, Karlsruhe, 17.01.2017
- Kuppler S. (2017) Gegenrede: „Oberflächenlagerung“. Plädoyers für jede der drei wichtigen Entsorgungsoptionen und Gegenrede. Vortrag. Research on Radioactive Waste Management: Ethics – Society – Technology, Braunschweig, 29.09.2017
- Lux K.-H. (2017) Vertikal-Projekt 5: Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (wartungsfreie Tiefenlagerung) – Ansätze und Ergebnisse aus fünf Jahren Forschung. Vortrag. Radioaktiver Abfall – was nun?, Braunschweig, 30.09.2017
- Plischke E. (2017) Sensitivity Analysis. Tagesprogramm. Risk Institute CDT Easter School, Liverpool, England, 21.04.2017. In Vorbereitung. Geplant
- Plischke E. und Röhlig K.-J. (2017) Weiterentwicklung der Softwareplattform ReSUS (Repository Simulation, Uncertainty Propagation and Sensitivity Analysis). Poster. Radioaktiver Abfall – was nun?, Braunschweig, 30.09.2017
- Reichardt M. (2017) Zwischenlagerung – Herausforderungen bei der erforderlichen langen Zwischenlagerung. Vortrag. Sommerakademie 2017: Atommüll – Herausforderungen für die nächste Generation, Wolfenbüttel, 05.08.2017. In Vorbereitung. Geplant
- Röhlig K.-J. (2017) Ist es möglich, ein sicheres Endlager zu bauen? Die Forschungsplattform ENTRIA. Interview. 3Sat: scobel: Gemeinsam zu neuen Erkenntnissen. Wie bewährt sich interdisziplinäre Forschung in der Praxis?, Mainz, 02.03.2017
- Röhlig K.-J. (2017) StandAG. Interview. NDR Info Mittagsecho, Hamburg, 23.03.2017
- Röhlig K.-J. (2017) Radioaktive Abfälle: Technik – Politik – Gesellschaft. Schulstunde. Politikunterricht Robert-Koch-Schule Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 25.04.2017
- Röhlig K.-J. (2017) Endlagerung radioaktiver Abfälle: Technische Hintergründe und gesellschaftlicher Konflikt. Vortrag. Vortrag in der Freimaurer-Loge „Georg zur gekrönten Säule“, Clausthal-Zellerfeld, 19.04.2017

- Röhlig K.-J. (2017) Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (wartungsfreie Tiefenlagerung). Vortrag. Radioaktiver Abfall – was nun?, Braunschweig, 30.09.2017
- Röhlig K.-J. (2017) Langzeitigkeit. Wissenschafts-Speed-Dating. Radioaktiver Abfall – was nun?, Braunschweig, 30.09.2017
- Röhlig K.-J. (2017) Interdisziplinarität und Grenzwerte. Kurzfilm mit Statement. Radioaktiver Abfall – was nun?, Braunschweig, 30.09.2017
- Röhlig K.-J. (2017) Nach dem Ausstieg aus der Kernenergie: Auf dem Weg zur sicheren Entsorgung der radioaktiven Abfälle? Vortrag. Akademische Feierstunde der TU-Clausthal; Vergabe des goldenen Diploms, Clausthal-Zellerfeld, 26.10.2017
- Röhlig K.-J., Plischke E., Li X. und Herrling D. (2017) Endlagerung und Mathematik: Sicherheitsanalyse für Endlagersysteme hochradioaktiver Abfälle. Projektstage. Projektstage des Mathematik-Leistungskurses, 11. Jg. Archenhold-Gymnasium, Clausthal-Zellerfeld, 14.07.2017
- Simonis U. E. (2017) Mahnmale des Atomzeitalters. Rezension zu: Problemfalle Endlager. Gesellschaftliche Herausforderungen im Umgang mit Atommüll
- Smeddinck U. (2017) Das Standortauswahlgesetz und seine Fortentwicklung – Ausgewählte Aspekte. Vorlesung. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2016/2017, Hannover, 31.01.2017
- Smeddinck U. (2017) Rechtgutachten zum Eingang der Empfehlungen der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ aus dem Abschlussbericht „Verantwortung für die Zukunft“ in die letzte Formulierungshilfe des Bundesumweltministeriums für einen Gesetzentwurf der Fraktionen. Kurzgutachten
- Smeddinck U. (2017) Das Standortauswahlgesetz 2017. Vortrag. Forum „Umwelt- und Planungsrecht in der Praxis und Wissenschaft“, Halle, 06.06.2017
- Smeddinck U. (2017) Das Standortauswahlgesetz und seine Fortentwicklung – Ausgewählte Aspekte. Vorlesung. Ringvorlesung „Radioaktive Abfälle und gesetzliche Regelungen“, Clausthal-Zellerfeld, 05.07.2017
- Smeddinck U., Eckhardt A., Budelmann H., Hocke P. und Pönitz E. (2017) Interdisziplinäre Problembearbeitung. Podiumsdiskussion. Radioaktiver Abfall – was nun?, Braunschweig, 30.09.2017
- Stahlmann J. (2017) Was wird mit den radioaktiven Reststoffen? – Nicht nur geotechnische Aspekte bei der Tiefenlagerung -. Vortrag. Gründungsfest KdStV Braunschweig, Braunschweig, 14.01.2017
- Walther C., Hocke P., Röhlig K.-J. und Smeddinck U. (2017) ENTRIA: Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle. Das Standortauswahlge-

setz, die Empfehlungen der Kommission und internationaler Vergleich.
Vortrag. LPS Sommerschule 2017, Berlin, 29.09.2017

2018

Smeddinck U. (2018) Das Standortauswahlgesetz 2017. Vortrag. Ringvorlesung „Kernenergie und Brennstoffkreislauf“ im Wintersemester 2017/18, Hannover, 30.01.2018

Röhlig K.-J., Plischke E., Li X. und Herrling D. (2018) Endlagerung und Mathematik: Sicherheitsanalyse für Endlagersysteme hochradioaktiver Abfälle. Projekttag. Projekttag des Mathematik-Leistungskurses, 11. Jg. Archenhold-Gymnasium, Clausthal-Zellerfeld, 28.06.2018

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	ENTRIA-Projektstruktur.	21
Abbildung 3.1	Darstellung der generischen ENCON-Tiefenlagerbehälter.	30
Abbildung 3.2	Lebenszyklus eines Tiefenlagers mit Vorkehrungen zur Rückholbarkeit und Monitoring.	62
Abbildung 3.3	Generisches Tiefenlagermodell (Stahlmann u. a., 2015).	64
Abbildung 3.4	Auflockerungszone in Steinsalz, Verschluss durch a) eine Abmauerung, b) ein Widerlager.	65
Abbildung 3.5	Auflockerungszone in Tonstein; Verschluss durch a) eine Abmauerung, b) ein Widerlager.	66
Abbildung 3.6	Zeitliche Entwicklung von Zustandsgrößen in der Nähe eines Einlagerungsbehälters für ein Endlagersystem im Tonsteingebirge.	75
Abbildung 3.7	Szenarien ohne Radionuklidfreisetzung außerhalb des ewG: vollständiger Einschluss.	78
Abbildung 3.8	Szenarien mit Radionuklidfreisetzung außerhalb des ewG bis in die Biosphäre: sicherer Einschluss oder kein sicherer Einschluss.	79
Abbildung 3.9	Frontansicht der Betonplatten mit der Position der verschiedenen Messpunkte.	98
Abbildung 3.10	Dreidimensionale Projektion der μ CT-Daten für Hämattitbeton (Probe H4-6).	99
Abbildung 3.11	Ergebnisse für Transmissionsmessungen an den verschiedenen Messstellen mit und ohne Fehlstellen für die verschiedenen Betonzusammensetzungen.	101
Abbildung 3.12	Histogramme der ROI an den Messpunkten 4 und 5 für NF (links) und an den Messpunkten 1 und 2 für HF (rechts).	101
Abbildung 3.13	Segmentierungsergebnisse für die Luftporen aus den μ CT-Scans für N, NF, H und HF.	102

Abbildung 3.14	Graustufenbild (links) und binäres Bild (rechts) von HF an Punkt 1.	102
Abbildung 3.15	Segmentierungsergebnisse für die Gesteinskörnung aus den μ CT-Scans für N, NF, H und HF. . . .	103
Abbildung 3.16	Vergleich experimenteller Transmissionsdaten mit den berechneten Daten aus den Ergebnissen der μ CT-Scans.	104
Abbildung 3.17	Vergleich der Transmissionskurven der Messungen (Experiment) mit den Geant4-Simulationen für H-Beton.	105
Abbildung 3.18	Unterschiedliche Zielstellungen der Expositionsmodellierung, modifiziert nach (Mosbach-Schulz, 2013).	109
Abbildung 3.19	Rhythmischer Wechsel von Treibhausgaskonzentration (hier CO_2), durchschnittliche Meerestemperatur (Oberflächenwasser) und Höhe des Meeresspiegels sowie Exzentrizität der vergangenen 500.000 Jahre zusammengestellt und neu geordnet nach Daten aus (Quinn u. a., 1991) und (Hansen u. a., 2013).	111
Abbildung 3.20	Ablaufplan und Entscheidungspfade für ein Monitoringprogramm in einem Tiefenlager.	141
Abbildung 3.21	Bereiche exponierter Zustandsänderungen unter Berücksichtigung der Bauphasen des Tiefenlagerprojekts.	155
Abbildung 5.1	Generelles Ablaufschema eines Delphi-Verfahrens.	403
Abbildung 5.2	Modell für die verwendete Einlagerungsstrecke mit einem POLLUX®-10-Tiefenlagerbehälter: a) Seitenansicht, b) Vorderansicht.	465
Abbildung 5.3	Modell des vereinfachten POLLUX®-10-Tiefenlagerbehälters.	466
Abbildung 5.4	Verteilung der Neutronen-Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10)$ um drei POLLUX®-10-Tiefenlagerbehälter.	467
Abbildung 5.5	Anteile der verschiedenen Strahlungskomponenten zu Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10)$ für einen POLLUX®-10-Tiefenlagerbehälter in einer Einlagerungsstrecke.	467

Abbildung 5.6	$\dot{H}^*(10)$ für Neutronen für einen POLLUX®-10-Tiefenlagerbehälter bei verschiedenen Umgebungsparametern.	468
Abbildung 5.7	Konfigurationen (MCNP6-Modelle) zur Untersuchung des Abschirmverhaltens von „vereinfachten Tiefenlagerbehältern“.	469
Abbildung 5.8	Neutronenfluenzspektren: experimentelle und simulierte Ergebnisse zu vier unterschiedlichen Konfigurationen.	470
Abbildung 5.9	Positionierung eines BOMAB-Phantoms bei der Modellierung der Teilschritte. Ein sitzendes Phantom (blau, rechts vergrößert) befindet sich im Ensemble Kabine/Führerstand (gelb) und Lokomotive (orange) und POLLUX (violett) auf Transportwagen (grün).	471
Abbildung 5.10	Tiefen-Personendosisleistung $\dot{H}_p(10)$ für vier untersuchten Teilschritte für die Behälterbeladungen ROCK-10, CLAY-3M und CLAY-3U.	472
Abbildung 5.11	Beispielhafte Dosisentwicklung bei den untersuchten Teilschritten für Einlagerung der Behälterbeladungen ROCK-10 (grün), CLAY-3U (blau und rote) und CLAY-3M (gelb).	472
Abbildung 5.12	Experimentelle Löslichkeit von vierwertigem $\text{PuO}_2(\text{am, hyd})$ (a+b) und $\text{NpO}_2(\text{am, hyd})$ (c+d) in carbonathaltiger 0.5, 2.0 und 5.0 M NaCl-Lösung mit $[\text{C}_{\text{tot}}] = [\text{CO}_2(\text{aq})] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] = 0.04 \text{ M}$ und 0.1 M unter reduzierenden Bedingungen.	482
Abbildung 5.13	Experimentelle Löslichkeit von fünfwertigem $\text{Ca}_{0.5}\text{NpO}_2(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}(\text{cr})$ in 0.1 (offene Symbole) und 5.0 M (geschlossene Symbole) NaCl-Lösung in Gegenwart von Spuren an CaCl_2 ($6 \cdot 10^{-4} \text{ M}$) unter redox-neutralen Bedingungen im Vergleich zu Modellrechnungen (0.1 M NaCl: gestrichelte Linie, 5.0 M NaCl: durchgezogene Linie).	484
Abbildung 5.14	Experimentelle Löslichkeit von initial sechswertigem $\text{Na}_2\text{Pu}_2\text{O}_7 \cdot x\text{H}_2\text{O}(\text{cr})$ in 0.1 (offene Symbole) und 5.0 M (geschlossene Symbole) NaCl-Lösung unter oxidierenden Bedingungen im Vergleich zu Modellrechnungen (0.1 M NaCl: gestrichelte Linie, 5.0 M NaCl: durchgezogene Linie).	485

Abbildung 5.15	Gesamtansicht des Globalmodells für ein generisches Endlagersystem im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge.	507
Abbildung 5.16	Detailansicht des Einlagerungsbereichs im Globalmodell für ein generisches Endlagersystem im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge.	507
Abbildung 5.17	Schnittdarstellung des ehemaligen Salzbergwerks Asse mit Markierung des Versuchsstandortes sowie schematische Übersicht über die Versuchsanordnung mit Positionierung der Messquerschnitte sowie der Messbohrlöcher (Bechthold u. a., 1999).	511
Abbildung 5.18	FLAC3D-Berechnungsmodell mit Angabe der wesentlichen Abmessungen und Detailansicht der für TOUGH2 transformierten Voronoi-Diskretisierung (Blanco Martín u. a., 2016).	512
Abbildung 5.19	Räumlich-zeitliche Temperaturentwicklung in der Einlagerungssohle des Referenz-Endlagersystems ohne Überfahrungssohle für die Wirtsgesteinformation Salinargebirge.	516
Abbildung 5.20	Gasinfiltrationszone im Salinargebirge um die Einlagerungsstrecken des 2. Einlagerungsfeldes sowie im Salinargebirge oberhalb des 2. Einlagerungsfeldes zum Zeitpunkt $t=20.000$ a nach Verschluss des Endlagers.	517
Abbildung 5.21	Gasinfiltrationszone im Salinargebirge um die Einlagerungsstrecken des 2. Einlagerungsfeldes sowie im Salinargebirge oberhalb des 2. Einlagerungsfeldes zum Zeitpunkt $t=80.000$ a nach Verschluss des Endlagers.	518
Abbildung 5.22	Positionierung der ausgewählten Beobachtungszonen zur Analyse der zeitlichen Entwicklung unterschiedlicher physikalischer Größen innerhalb des Grubengebäudes (links) bzw. im Salinargebirge oberhalb des Grubengebäudes (rechts).	518
Abbildung 5.23	Zeitliche Entwicklung der Salzgrusporosität in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes.	519
Abbildung 5.24	Zeitliche Entwicklung des Porengasdrucks in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes.	519

Abbildung 5.25	Zeitliche Entwicklung der Temperatur in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes.	520
Abbildung 5.26	Porenwassermigration in der Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t \approx 15,31$ a nach Beginn der Betriebsphase.	523
Abbildung 5.27	Zeitliche Entwicklung der Temperatur in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes.	524
Abbildung 5.28	Zeitliche Entwicklung des Wassersättigungsgrades in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes.	524
Abbildung 5.29	Zeitliche Entwicklung des Porengasdrucks in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes.	525
Abbildung 5.30	Flüssigkeitssättigung in den Einlagerungsstrecken sowie im Tonsteingebirge oberhalb des 2. Einlagerungsfeldes zum Zeitpunkt $t=300.000$ a nach Verschluss des Endlagers.	526
Abbildung 5.31	Zeitliche Entwicklung des Porengasdrucks in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes im Tonsteingebirge bei Annahme einer 100-fach erhöhten Behälterkorrosionsrate.	528
Abbildung 5.32	Porengasmigration innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t=1.000$ a nach Verschluss des Endlagers im Tonsteingebirge.	529
Abbildung 5.33	Porengasmigration innerhalb des Streckensystems zum Zeitpunkt $t=10.000$ a nach Verschluss des Endlagers im Tonsteingebirge.	529
Abbildung 5.34	Zeitliche Entwicklung des Porengasdrucks in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes im Tonsteingebirge.	530
Abbildung 5.35	Zeitliche Entwicklung des Wassersättigungsgrades in den Beobachtungszonen 1-5 innerhalb des Grubengebäudes im Tonsteingebirge.	531
Abbildung 5.36	Flüssigkeitssättigung in den Einlagerungsstrecken sowie im Tonsteingebirge oberhalb des 2. Einlagerungsfeldes zum Zeitpunkt $t=300.000$ a nach Verschluss des Endlagers.	531

Abbildung 5.37	Porenwassermigration in der Wirtsgesteinsformation Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t=10.000$ a nach Verschluss des Endlagers.	533
Abbildung 5.38	Porengasmigration innerhalb des Streckensystems sowie in der Störungszone zum Zeitpunkt $t=10.000$ a nach Verschluss des Endlagers im Tonsteingebirge.	534
Abbildung 5.39	Flüssigkeitssättigung in den Einlagerungsstrecken sowie im umgebenden Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t=20.000$ a nach Verschluss des Endlagers (Schnitt senkrecht zur Störungsebene). . . .	535
Abbildung 5.40	Flüssigkeitssättigung in den Einlagerungsstrecken sowie im umgebenden Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t=60.000$ a nach Verschluss des Endlagers (Schnitt senkrecht zur Störungsebene). . . .	535
Abbildung 5.41	Flüssigkeitssättigung in den Einlagerungsstrecken sowie im umgebenden Tonsteingebirge zum Zeitpunkt $t=300.000$ a nach Verschluss des Endlagers (Schnitt senkrecht zur Störungsebene). . . .	536
Abbildung 5.42	Globalmodell für ein generisches Endlagersystem im Salinargebirge mit zusätzlichem Laugennest. .	537
Abbildung 5.43	Zeitliche Entwicklung des Porenwasserdrucks und der Temperatur im Laugennest.	537
Abbildung 5.44	Sekundärpermeabilität im infiltrierten Bereich (Maximalwerte) etwa 12 Jahre nach Verschluss des Endlagers.	538
Abbildung 5.45	Flüssigkeitssättigung im Salinargebirge etwa 20 Jahre nach Verschluss des Endlagers.	539
Abbildung 5.46	Prüfkörpervorbereitung für einen Infiltrationsversuch.	541
Abbildung 5.47	Primär- und sekundärseitige Gasdruckentwicklung.	542
Abbildung 5.48	Primär- und sekundärseitige Gasvolumenentwicklung.	543
Abbildung 5.49	Schematische Darstellung der Versuchsanlage zur Charakterisierung der funktionalen Beziehung zwischen Sättigungsgrad und fluidbezogenen Relativpermeabilitäten im Tonstein.	544
Abbildung 5.50	Versuchsanlage zur Charakterisierung der funktionalen Beziehung zwischen Sättigungsgrad und fluidbezogenen Relativpermeabilitäten im Tonstein.	544

Abbildung 5.51	Draufsicht (oben) bzw. Seitenansicht (unten) der Versuchsanlage zur Charakterisierung der funktionalen Beziehung zwischen Sättigungsgrad und Kapillardruck im Tonstein.	544
Abbildung 5.52	Überblick über das Stoffmodell Lux / Wolters.	546
Abbildung 5.53	Struktureller Aufbau des weiterentwickelten Stoffmodells Lux / Wolters (Lux u. a., 2018).	547
Abbildung 5.54	Modifizierte laborative Versuchsbasis für den weiterentwickelten Schädigungsansatz des Stoffmodells Lux / Wolters (Lux u. a., 2018).	548
Abbildung 5.55	Vergleich der Untersuchungsbereiche in Kurzzeitversuchen und in Langzeitversuchen in Bezug auf (a) Beanspruchungsniveau und (b) Deformationsrate (Lux u. a., 2018).	549
Abbildung 5.56	Vereinfachte Darstellung des Programmablaufs von TOUGH2-EOS9nT (Moridis u. a., 1999).	554
Abbildung 5.57	Das Globalmodell mit den Stoffkomponenten in einem Endlagersystem im Tongebirge (links) und das Grubengebäude für das Endlager mit Vorkehrung zur Rückholung mit Monitoringsohle 40m über dem Grubengebäude (rechts).	555
Abbildung 5.58	Konzentrationsverteilung von ^{233}U nach a) 30.000 Jahren, b) 1 Mio. Jahren.	559
Abbildung 5.59	Konzentrationsverteilung von ^{36}Cl in kg/m^3 nach a) 1.000 Jahren, b) 30.000 Jahren, c) 100.000 Jahren, d) 1.000.000 Jahren.	559
Abbildung 5.60	Konzentrationsverlauf der Actiniden an den Beobachtungspunkten über 1 Mio. Jahre a) im Basisrechenfall für das 400 m-Modell, b) im achten alternativen Rechenfall (Perm. von Tongestein = $1.0 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$) für das 400 m-Modell, c) im Basisrechenfall für das 100 m-Modell.	560
Abbildung 5.61	Konzentrationsverlauf von ^{36}Cl an den Beobachtungspunkten über 400.000 Jahre im Basisrechenfall a) für das 400 m-Modell, b) für das 400 m-Modell mit Überwachungssohle.	561
Abbildung 5.62	Histogramm der Logarithmen der Urankonzentrationen am Punkt 4 m über dem Grubengebäude im Modell ohne (links) und mit (rechts) Überwachungssohle und Bohrlöchern.	563

Abbildung 5.63	Streudiagramm zwischen den maximalen Konzentrationen von ^{237}Np am Punkt 4 m über dem Grubengebäude im Modell und a) den Kd-Werten von ^{237}Np , b) den Löslichkeitsgrenzen von ^{237}Np , c) dem Kd-Wert von ^{229}Th	563
Abbildung 5.64	Kristallisation von Salzmineralen (hellblau) in hochsalinaren Lösung (dunkelblau) mit fortschreitender Kristallisation/abnehmender Lösungsmenge von links nach rechts.	566
Abbildung 5.65	Austrag interkristalliner Lösung aus dem intakten Salzgebirge (A) über mechanisch überprägte Zonen im Steinsalz (B) bis in die Behältermatrix (verfüllte Strecke, grau, C)	568
Abbildung 5.66	Zutritt von unentdeckten hochsalinaren Lösungen und Versagen eines Behälters. Mögliche Szenarien: Transport entlang von A) technischen Barrieren, B) Wegsamkeiten der geologischen Barriere.	569
Abbildung 5.67	Die Lage der Gleichgewichtslösung Q bei 35 und 83°C im Jänecke-Diagramm nach den Daten von (Gudowius, 1984).	571
Abbildung 5.68	Ausfällung einzelner Minerale bei der Abkühlung einer Lösung Q von 90 auf 20°C.	574
Abbildung 5.69	Lösungskonzentration von Rb (kompatibel) und Zn (inkompatibel) in Abhängigkeit von der Temperatur bei der fraktionierten Kristallisation. . . .	579
Abbildung 5.70	Lösungskonzentration von Cs (kompatibel) und Co (inkompatibel) in Abhängigkeit von der Restlösung F bei der fraktionierten Kristallisation entlang des Temperaturprofils von 90 auf 20°C. . . .	580
Abbildung 5.71	3D-Grundwasserströmungsmodell und mit PHAST modellierte Grundwasserstände. Die aus dem Endlager in das Deckgebirge einströmende kontaminierte Lösung (rot) wird als Quelle in das Modell integriert und räumlich durch beliebige x- und y-Koordination bei $z = 0$ bestimmt.	583

Abbildung 5.72	Profile zur Anordnung von Grundwasserleitern und Grundwasserstauern in zwei PHAST-Szenarien. Szenario A: Oberhalb des Salzstocks befindet sich sehr durchlässiges Lockermaterial; Szenario B: Über dem Salzstock liegt eine weniger durchlässige Gesteinsschicht, die von einer sehr undurchlässigen Schicht überlagert wird. Darüber liegt homogener, hoch durchlässiger Sand.	584
Abbildung 5.73	Urankonzentration nach 1.000 und 10.000 Jahren kontinuierlichen Zuflusses einer kontaminierten Lösung aus dem Endlagerbereich für das Szenario A.	584
Abbildung 5.74	Urankonzentration nach 1.000 und 10.000 Jahren kontinuierlichen Zuflusses einer kontaminierten Lösung aus dem Endlagerbereich für das Szenario B.	585
Abbildung 5.75	Zeitliche Ausbreitung des Radionuklids ^{135}Cs für das Szenario A. Die Auflösung der Konzentrationsfahne nach 8.000 Jahren beruht auf der Ausspülung durch nachstrebendes Grundwassers bezogen auf das statische Betrachtungsvolumen. . .	588
Abbildung 5.76	Zeitliche Ausbreitung des Radionuklids ^{137}Cs für das Szenario A. Die Auflösung der Konzentrationsfahne nach 1.000 Jahren beruht auf dem Zerfall des ^{137}Cs ($t/2 = 30,1 \text{ a}$).	589
Abbildung 5.77	Ausgewählte Definitionen der Rückholbarkeit von unterschiedlichen Institutionen.	605
Abbildung 5.78	Mögliche Gründe für eine Rückholung aus geotechnischer und gesellschaftlicher Perspektive. . .	606
Abbildung 5.79	Gebirgstragverhalten nach Bildern von Modellversuchen aus (Jacobi, 1981).	608
Abbildung 5.80	Vergleich der relevanten Eigenschaften verschiedener Wirtsgesteine bei einer längerer Offenhaltung aufgrund der Anforderung Rückholbarkeit. .	609
Abbildung 5.81	Gegenüberstellung der Teufenlage des Tiefenlagers, Permeabilität des Wirtsgesteins sowie die Merkmale zur Rückholung und Dichtigkeit. . . .	611
Abbildung 5.82	Schematische Darstellung eines Verschlussbauwerks in einer Strecke im Steinsalz.	612

Abbildung 5.83	Schematische Darstellung eines Verschlussbauwerks in einer Strecke im Ton, Tonstein oder kristallinen Hartgestein.	613
Abbildung 5.84	Wärmeausbreitung eines ENCON-10 in verschiedenen Wirtsgesteinen 10 Jahre nach der Einlagerung.	614
Abbildung 5.85	Zeitabhängiger Temperaturverlauf an der Grenzoberfläche zwischen Behälter und Versatz (Abstand zwischen Einlagerungsstrecken $B = 60$ m, Zwischenlagerungszeit $t_z = 40$ a).	615
Abbildung 5.86	Zeitabhängiger Temperaturverlauf in den Monitoringstrecken (Abstand zwischen Einlagerungsstrecken $B = 60$ m, Zwischenlagerungszeit $t_z = 40$ a).	616
Abbildung 5.87	Vorgehensweise bei der Anwendung der Szenariotechnik (Geschka u. Hammer, 1990).	617
Abbildung 5.88	Sinnbildliche Darstellung des Normalszenarios innerhalb denkbarer Zukunftsprojektionen.	619
Abbildung 5.89	Spannungen und Permeabilitäten in den versetzten Einlagerungsbereichen in Steinsalz (oben), Ton / Tonstein (Mitte) und kristallinem Hartgestein (unten).	620
Abbildung 5.90	Orte exponierter Zustandsänderungen im Bereich der Einlagerungsstrecke.	626
Abbildung 5.91	Lasttragende Strukturen der Behälter am Beispiel des ENCON S.	637
Abbildung 5.92	Einspannung des Behälters im Lastaufnahmemittel zur Manipulation des Behälters.	641
Abbildung 5.93	Werkzeug für die spanende in-situ-Bearbeitung von Rohrleitungen (Quelle: http://www.protem-gmbh.de/produkte/nach-anwendung/rohre-und-pipelines-bearbeiten ; Protem GmbH Dettenheim; zuletzt abgerufen 20.02.2018).	642
Abbildung 5.94	Aufbau einer Twist-Lock-Kupplung (Quelle: http://www.globuscontainer.com/pub/index.php/de/constructions/container-parts/twist-locks/item/25-semi-automat-twist-lock-tw103 ; Globus Container Thessaloniki; zuletzt abgerufen 21.02.2018).	645
Abbildung 5.95	Schienengeführter Transportwagen für POLLUX®-Behälter (DBETech, Siemag Tecberg).	646

Abbildung 5.96	Handhabungsgerät für POLLUX®-Behälter (Quelle: https://www.dbe-technology.de/ueber-uns/aktuelles/d/aktualisierung-des-deutschen-safeguards-konzeptes-fuer-verschiedene-wirtsgesteine/ ; DBE Technology GmbH Peine, zuletzt abgerufen 20.02.2018).	647
Abbildung 5.97	Einseitig freigelegter Behälter in einer Einlagerungsstrecke.	648
Abbildung 5.98	Gesamtansicht des Globalmodells mit Monitoringsohle und Monitoringbohrlöchern für eine generische HAW-Entsorgungsanlage im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge.	650
Abbildung 5.99	Detailansicht des Einlagerungsbereichs im Globalmodell mit Monitoringsohle und Monitoringbohrlöchern für eine generische HAW-Entsorgungsanlage im Salinar- bzw. im Tonsteingebirge (Lage der Monitoringstrecken perspektivisch verzerrt). . . .	651
Abbildung 5.100	Exemplarische Darstellung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für ein Tiefenlager- / Endlagerbergwerkssystem mit Monitoringsohle.	652
Abbildung 5.101	Position der Beobachtungspunkte zur Analyse der zeitabhängigen Entwicklung fluiddynamisch relevanter physikalischer Zustandsgrößen (links: Einlagerungssohle, mittig: Wirtsgesteinsinformation, rechts: Überwachungsohle).	655
Abbildung 5.102	Zeitabhängige Entwicklung des Sättigungsgrades in ausgewählten Berechnungszonen innerhalb des Grubengebäudes.	656
Abbildung 5.103	Visualisierung der Gasmigration in Einlagerungssohle, Monitoringbohrlöchern und Monitoringsohle zum Zeitpunkt $t = 1.000$ a nach Verschluss der Einlagerungssohle für das Referenz-Tiefenlager- / Endlagersystem im Tonsteingebirge. . . .	657
Abbildung 5.104	Mögliche Einteilung der Zwischenlagersysteme nach (Romanato, 2011, S. 2).	666
Abbildung 5.105	Nasslager im finnischen Olkiluoto, schematisch nach www.posiva.fi	667
Abbildung 5.106	Regelwerkspyramide nach NDA (2017).	671
Abbildung 5.107	Stellung der Safety Requirements im Rahmen der Safety Standards nach IAEA (2012a).	673

Abbildung 5.108	Grundriss der Anlage HABOG, NL, in Anlehnung an www.iaea.org	694
Abbildung 5.109	Antrieb für ein schweres Tor in der Anlage HA- BOG, Foto: Reichardt	695

Tabellenverzeichnis

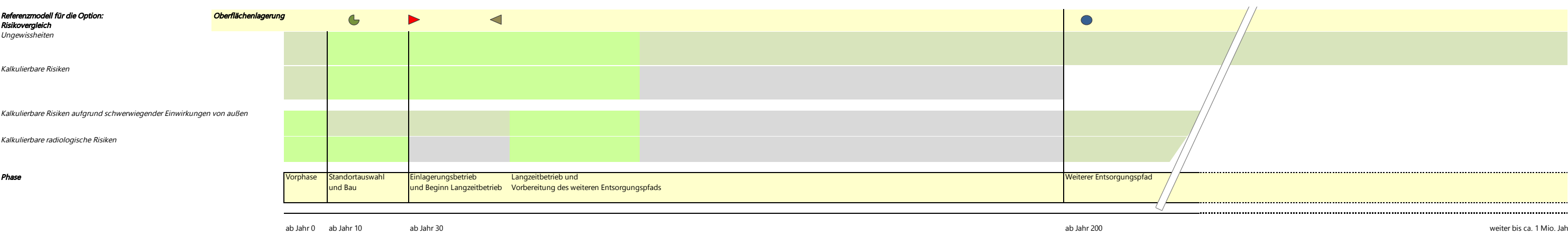
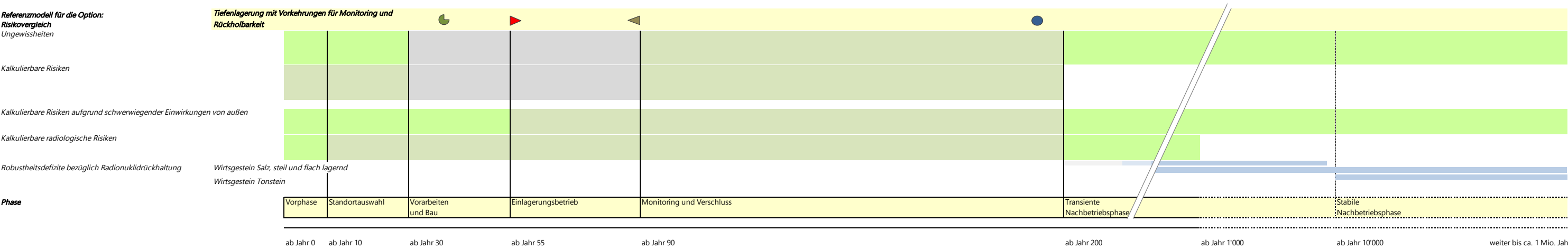
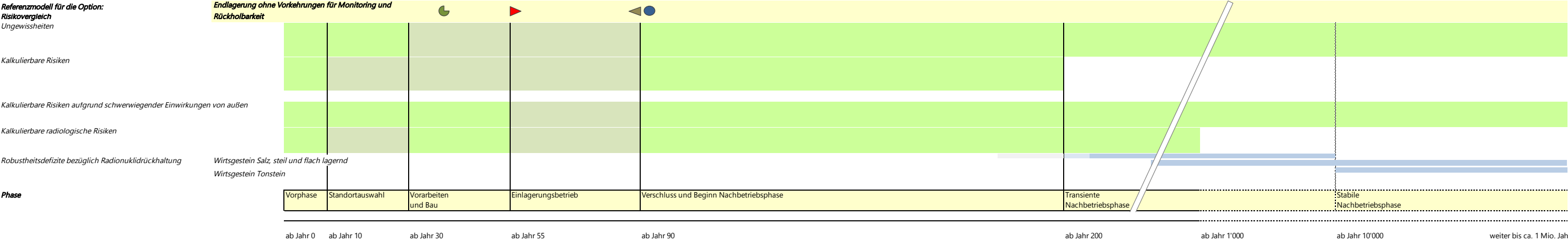
Tabelle 3.1	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen (RSF) für Tiefenlager in Salzgestein und Tonstein. Die kursiv gesetzten Komponenten werden nicht betrachtet (Quelle: (Fischer-Appelt u. Baltes, 2010), verändert).	59
Tabelle 3.2	Zusammenfassung der Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine für die Tiefenlagerung.	69
Tabelle 5.1	Abschätzung der Kollektivdosis für zwei Szenarien für die Rückholung aus einem Endlager in Tonstein.	461
Tabelle 5.2	Abschätzung der Kollektivdosis für zwei Szenarien für die Rückholung aus einem Endlager in Kristallingestein.	462
Tabelle 5.3	Abschätzung der Kollektivdosis für zwei Szenarien für die Rückholung aus einem Endlager in Steinsalz.	463
Tabelle 5.4	Zusammenfassung orientierender geochemischer Randbedingungen (Lösungszusammensetzungen) für die im Arbeitspaket betrachteten generischen Tiefenlagerkonzepte. $[\text{CO}_3^{2-}]_{eq}$ bezeichnet die berechnete Gleichgewichtskonzentration an Carbonat.	476
Tabelle 5.5	Abgeschätzte Löslichkeiten für die Actinide Am, Pu und U für generische Tiefenlager ohne bzw. mit Rückholbarkeit entsprechend den in Tabelle 5.4 definierten orientierenden Randbedingungen.	479
Tabelle 5.6	Im Arbeitspaket 5.3 für das Modell ohne Vorkehrung zur Rückholung berücksichtigte Rechenfälle.	556
Tabelle 5.7	Im Arbeitspaket 5.3 für das Modell mit Vorkehrung zur Rückholung berücksichtigte Rechenfälle.	556
Tabelle 5.8	Löslichkeitsgrenzen (Quellterme) und Kd-Werte der berücksichtigten Radionuklide.	558
Tabelle 5.9	Statistische Verteilungsparameter für die probabilistische Analyse mit dem Code ReSUS.	562
Tabelle 5.10	Ausgefallene Minerale bei der Fraktionierung einer Lösung der Zusammensetzung Q von 90 auf 20°C, in 10°C Temperaturschritten der Q- und R-Lösung in einem Schritt von 90 auf 20°C.	574

Tabelle 5.11	Modal-Koeffizienten $X_{xi...}$ (als Fraktion von 1) umgerechnet aus den Ergebnissen der Gleichgewichtskristallisation aus PHREEQC (Tabelle 5.10); Verteilungskoeffizient $D_{xi...}$ für die einzelnen Minerale als Mittelwert aller Temperaturen und Lösungszusammensetzungen für Rb und Zn und der Radionuklid-relevanten Spurenelemente Co und Cs für die Berechnung des Gesamtverteilungskoeffizienten.	576
Tabelle 5.12	Modal-Koeffizienten X_{xi} (als Fraktion von 1) umgerechnet aus den Modellierungsergebnissen der fraktionierten Kristallisation aus PHREEQC (Tabelle 5.11).	578
Tabelle 5.13	Verteilungskoeffizient D_{xi} für die einzelnen Mineralphasen nach Temperaturstufen für Rb und Zn, sowie Co und Cs als Radionuklid-relevante Elemente. Die D-Mittelwerte für die Temperaturen 45 und 69 °C wurden interpoliert.	578
Tabelle 5.14	D_{ges} und C_{Lsg} in ppm für Rb und Zn der fraktionierten Kristallisation zusammen mit der prozentualen Änderung der Ausgangskonzentration C_0	579
Tabelle 5.15	Verhalten der Spurenelemente Co und Cs der fraktionierten Kristallisation zusammen mit den verbleibenden Prozent der Ausgangskonzentration C_0	580
Tabelle 5.16	Anforderungskatalog und technische Realisierungsvarianten (Auszug).	699
Tabelle 8.1	Veröffentlichungen, Fachbeiträge und Nachwuchsförderung.	725
Tabelle 8.2	Öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen, Bildungsangebote für Externe sowie Maßnahmen zur Aus- und Weiterbildung.	727

Risikokarte

Bezugspunkt: Schutz des Menschen

Prämissen für den Risikovergleich:	Bei jeder Entsorgungsoption ist ein schrittweises Vorgehen vorgesehen, bei der die Option unter Berücksichtigung aktueller Erkenntnisse und Entwicklungen konkretisiert wird. Der Vergleich wird unter der Perspektive der Gegenwart und des heutigen Wissensstandes vorgenommen.
Vorgehen beim Risikovergleich:	Der Risikovergleich erfolgt mit einem Outranking-Verfahren, das Präferenzen bezüglich geringer Ungewissheiten, geringer kalkulierbarer Risiken und geringer Robustheitsdefizite abbildet. Der Betrachtung liegen die Referenzmodelle von ENTRIA zugrunde, also generische Optionen, bei denen nicht nach bautechnischen Lösungen und nur bedingt nach Wirtsgestein differenziert wird.



Legende

Farbliche Kennzeichnung Ordinale Skala für Ungewissheiten

- 1

Im Outranking-Verfahren schneidet keine andere Option besser ab.
- 2

Im Outranking-Verfahren schneidet eine Option besser ab, oder es schneiden zwei Optionen besser ab.
- 3

Die Option wird im Outranking-Verfahren nach einer besten und einer zweitbesten Option als Dritte beurteilt.
- Für die vorliegende Phase ist keine Aussage zur Option möglich.

Farbliche Kennzeichnung Ordinale Skala für Robustheitsdefizite

- Für die vorliegende Phase wurde kein Robustheitsdefizit identifiziert, oder es ist zur vorliegenden Phase keine Aussage möglich
- Für die vorliegende Phase wurden eines oder mehrere Robustheitsdefizite identifiziert.

- Baubeginn des Tiefen- oder Oberflächenlagers
- Beginn der Einlagerung in das Tiefen- oder Oberflächenlager
- Ende der Einlagerung in das Tiefen- oder Oberflächenlager
- Verschluss des Tiefenlagers
Betriebsende des Oberflächenlagers